

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-353-45>

УДК 631.358

СУВОРІН ОЛЕГ

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0009-0004-9084-3411>e-mail: Bestwebdoctors@gmail.com**КАБАЧІЙ ВЛАДИСЛАВ**

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0009-0001-3158-2889>e-mail: vkabachiy@gmail.com**КУЛИК ЯРОСЛАВ**

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0001-8327-8259>e-mail: kulyk.y.a@vntu.edu.ua**ОВЧИННИКОВ КОСТЯНТИН**

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0003-4685-1137>e-mail: k_ovchinnikov@vntu.edu.ua

АНАЛІЗ ПАРАМЕТРІВ МІКРОКЛІМАТУ ДЛЯ УПРАВЛІННЯ ТЕПЛИЦЕЮ

У статті виконується огляд теплиці як об'єкта дослідження. Проведений аналіз параметрів управління теплицями для підвищення ефективності вирощування культур у контрольованому середовищі.

Описано параметри мікроклімату теплиці, визначені оптимальні умови вирощування та управління мікрокліматом.

Розглянуто декілька моделей теплиць за поколіннями. Приділено увагу аналізу ключових параметрів мікроклімату, таких як температура, вологість, тиск водяної пари, точка роси, рівень CO₂ та освітленість (PAR), що впливають на агроцикли та продуктивність вирощування культур, зокрема ремонтантної полуниці. Розглянуто типову динаміку зміни цих параметрів протягом доби, а також їхній взаємозв'язок з використанням автоматизованих пристроїв (нагрівачів, освітлення, вентиляції, зрошення, добрив тощо).

Визначено основні типи теплиць за поколіннями залежно від рівня технологічного оснащення та автоматизації. У роботі проаналізовано виклики та супроводжують управління тепличними об'єктами: високу вартість енергоносіїв, нестачу кваліфікованих кадрів, труднощі підтримки сталого мікроклімату, проблему конденсації вологи та недостатнє розуміння агротехнічних потреб культур з боку фермерів.

Результати огляду свідчать про значний потенціал подальшого розвитку тепличних технологій, спрямованих на підвищення врожайності, ефективне використання ресурсів і мінімізацію впливу на довкілля, оптимізацію для отримання продукції постійної якості.

Проведений огляд досліджень підтверджує актуальність розробки комплексної системи управління агроциклом у теплицях. Урахування викликів та можливостей, зазначених у статті, дозволить сформувати більш адаптивний і стійкий підхід до вирощування культур у контрольованому середовищі.

Визначено перспективні напрями досліджень, зокрема вдосконалення систем автоматизованого управління.

Ключові слова: теплиця, моніторинг мікроклімату, управління агроциклом.

**SUVORIN OLEG, KABACHII VLADYSLAV,
KULYK YAROSLAV, OVCHYNNYKOV KOSTYANTYN**
Vinnytsia National Technical University

ANALYSIS OF MICROCLIMATE PARAMETERS FOR GREENHOUSE MANAGEMENT

The article reviews the greenhouse as an object of research. The parameters of greenhouse management are analyzed to improve the efficiency of growing crops in a controlled environment.

The parameters of the greenhouse microclimate are described, and the optimal conditions for growing and managing the microclimate are determined.

Several models of greenhouses by generations are considered. Attention is paid to the analysis of key microclimate parameters, such as temperature, humidity, water vapor pressure, dew point, CO₂ level and illumination (PAR), which affect the agrocycles and productivity of crops, in particular remontant strawberries. The typical dynamics of changes in these parameters during the day, as well as their relationship with the use of automated devices (heaters, lighting, ventilation, irrigation, fertilizers, etc.) are considered.

The main types of greenhouses by generation are identified, depending on the level of technological equipment and automation. The paper analyzes the challenges that accompany the management of greenhouse facilities: high energy costs, lack of qualified personnel, difficulties in maintaining a stable microclimate, moisture condensation, and insufficient understanding of the agrotechnical needs of crops by farmers.

The results of the review indicate a significant potential for further development of greenhouse technologies aimed at increasing yields, efficient use of resources and minimizing environmental impact, and optimization for consistent quality products.

The conducted research review confirms the relevance of developing an integrated agro-cycle management system in greenhouses. Taking into account the challenges and opportunities outlined in the article will allow for a more adaptive and sustainable approach to growing crops in a controlled environment.

Promising areas of research, including the improvement of automated control systems, have been identified.

Keywords: greenhouse, microclimate monitoring, agrocycle management.

Стаття надійшла до редакції / Received 01.05.2025

Прийнята до друку / Accepted 23.05.2025

Вступ

Для розуміння особливостей роботи параметрів мікроклімату в теплицях аналізувалась класична література, яка описує типові проблеми при вирощуванні рослин та нещодавні наукові публікації, які показують сучасні можливості і їх затратність по вирішенню цих проблем. Проведений огляд показав недостатню увагу до комплексного параметрами мікроклімату з урахуванням агроциклу.

В умовах глобальної нестабільності погодних факторів дедалі більшого значення набувають технології керованого середовища (Controlled Environment Agriculture, CEA), серед яких тепличне господарство є найпоширенішим прикладом практичної реалізації.

Теплиці дозволяють створювати штучно регульовані умови, що забезпечують незалежність від зовнішнього клімату, подовжений вегетаційний період і підвищену продуктивність.

Середземноморські теплиці продемонстрували високу ефективність використання ресурсів, особливо води, порівняно з вирощуванням у відкритому ґрунті [1,2]. Проте проблеми залишаються, включаючи вплив на навколишнє середовище та критичне сприйняття споживачами «промислового» виробництва харчових продуктів [2]. Досягнення тепличних технологій, таких як закриті системи з рециркуляцією води та збагаченням CO₂, продемонстрували підвищення врожайності та продуктивності води в напівпосушливих регіонах [3]. Останні розробки в CEA включають вертикальне землеробство, теплиці на дахах і рослинні фабрики, які вирішують питання урбанізації та продовольчої безпеки [4]. Ці системи містять інновації в матеріалах каркаса та покриття, моніторингу навколишнього середовища та контролю мікроклімату. Незважаючи на те, що CEA пропонує багатообіцяючі рішення для сталого міського сільського господарства, проблеми з впровадженням і визнанням громадськості залишаються [4,2].

Полуниця є однією з найпопулярніших, але водночас і технологічно найскладніших ягідних культур, вирощування якої в тепличних умовах дозволяє подовжити сезон реалізації та забезпечити стабільну якість плодів. Завдяки інтенсивним технологіям під покриттям можливо досягти високої врожайності навіть у позасезонний період. При цьому важливу роль відіграють автоматизовані системи контролю параметрів мікроклімату – таких як температура, вологість повітря й ґрунту, а також керування поливом і живленням відповідно до потреб рослин [5]. У рамках таких технологій досліджуються різні типи субстратів – які забезпечують порівнювані показники врожайності [6]. Іntenсивне вирощування потребує ретельної підготовки грядок, стерилізації субстрату та контролю на всіх етапах розвитку рослини, включаючи догляд за розсадою [7].

Інтеграція штучного інтелекту (ШІ) у тепличне виробництво дозволяє оптимізувати врожайність, ефективніше використовувати ресурси й підвищувати стійкість агросистем. Системи на основі ШІ автоматизують зрошення, керування живленням і моніторинг шкідників, що сприяє скороченню витрат і збільшенню прибутковості [8]. Системи на базі штучного інтелекту в поєднанні з пристроями Інтернету речей (IoT) дозволяють в реальному часі відстежувати та контролювати такі параметри навколишнього середовища, як температура та вологість повітря, вологість ґрунту [9]. Бездротові датчики та інструменти Інтернету речей, інтегровані з алгоритмами штучного інтелекту, забезпечують гнучку реалізацію та скорочення споживання енергії у великих теплицях [10]. Системи управління теплицями на основі ШІ демонструють потенціал значно перевершити традиційні методи, включно з автоматизованими замкнутими циклами та рішеннями людей-експертів. Такі системи здатні у режимі реального часу аналізувати великий обсяг даних з сенсорів для точного прогнозування розвитку рослин і автоматизованого прийняття рішень. ШІ забезпечує оптимізацію зрошення, освітлення й мікроклімату, що веде до підвищення врожайності, стабільної якості продукції та ефективного використання ресурсів [11, 12]. Хоча виклики, зокрема висока вартість впровадження та технологічні бар'єри, залишаються актуальними, довгострокові переваги в аграрній продуктивності та сталості є суттєвими. Також залишається актуальним питання узгодження технічних параметрів із біологічними потребами конкретних культур, що потребує системного аналізу та узагальнення наявних знань.

Управління мікрокліматом у теплицях стикається з низкою об'єктивних труднощів, що обмежують ефективне впровадження автоматизованих систем. По-перше, існує потреба в автоматичному моніторингу численних параметрів (температура, вологість, рівень CO₂), які змінюються впродовж доби та агроциклів. По-друге, штучний інтелект та алгоритми управління часто мають меншу гнучкість порівняно з досвідченими аграріями, особливо при нестандартних ситуаціях. По-третє, обмеженість і неповнота навчальних даних (наприклад, недостатньо прикладів для конкретних сортів або регіонів) знижують точність прогнозів. Додатково, висока вартість обладнання та енергоспоживання систем клімат-контролю є фінансовим бар'єром для малих і середніх господарств. Також ускладнена комерціалізація інновацій через нестачу адаптованих під локальні умови рішень. Нарешті, існує компроміс між точністю алгоритмів і швидкістю реагування систем, що критично при різких змінах умов. Усі ці фактори ускладнюють ефективне регулювання умов вирощування, особливо з урахуванням культурної специфіки та фаз розвитку різних сільгоспкультур.

Основну увагу приділено класифікації типів теплиць за поколіннями; особливостям агроциклу вирощування культур; викликам, пов'язаним із контролем параметрів середовища; взаємозв'язку між ключовими кліматичними факторами.

Особливий акцент зроблено на оптимальних умовах вирощування полуниці як показової культури, чутливої до відхилень мікроклімату.

Метою дослідження є огляд сучасного стану технічного забезпечення та автоматизації мікроклімату в тепличних господарствах з метою виявлення основних проблем і недоліків існуючих систем керування, формулювання актуальних науково-технічних задач і визначення напрямків подальших досліджень для підвищення ефективності функціонування тепличних комплексів.

Завдання статті:

1. Провести огляд теплиці як об'єкта управління в умовах контрольованого середовища.
2. Проаналізувати основні параметри мікроклімату та їхній вплив на агроцикл вирощування культур, систематизувати покоління тепличних споруд за рівнем автоматизації та технологічним оснащенням, визначити взаємозв'язки між параметрами мікроклімату та способами їх регулювання.
3. Визначити перспективні напрямки подальших досліджень у галузі автоматизації тепличного господарства.

Моделі теплиць

Керування мікрокліматом безпосередньо залежить від рівня технологічної оснащеності тепличної споруди. У цьому контексті доцільним є розгляд класифікації теплиць за поколіннями, що враховує ступінь автоматизації, тип конструкції, енергозабезпечення та функціональні можливості.

Закритим ґрунтом (або захищеним середовищем) називають спеціальні конструкції – парники, утеплені ґрунти, класичні теплиці, а також сучасні високотехнологічні модулі, – призначені для вирощування розсади, овочевих культур та вигонки зелені поза природним сезоном. Їх відмінність від відкритого ґрунту полягає в можливості контролювати середовище вирощування (температура, вологість, світло), що критично для цілорічного виробництва.

Станом на сьогодні у технічній літературі часто використовують поділ за поколіннями теплиць (Generation 1, 2, 3...), які відображають перехід від простих плівкових конструкцій до автономних інтелектуальних модулів з IoT та III. Наведена в таблиці 1 класифікація ґрунтується на критеріях: тип конструкції, рівень автоматизації, функціональність і можливості регулювання мікроклімату.

Таблиця 1

Покоління	Характеристика	Рівень автоматизації	Технологічні особливості автоматизації
1–2	Прості укриття (плівка, агроволокно, тунелі, парники)	Відсутній / дуже низький	Ручне накриття, елементарна вентиляція (відкривання-закривання), без автоматизованих систем
3	Балагани – низькі прості теплиці з дерева або металу	Низький	Ручне керування мікрокліматом, можуть бути мінімальні засоби вентиляції
4	Професійні металеві теплиці арочної або скатної форми (висота 3-5,5 м)	Середній	Автоматичне відкривання вікон і фрамуг, датчики температури й вологості
5	Теплиці з вентиляцією, опаленням, затіненням (висота 5,5-7 м)	Вище середнього	Вентиляція, аварійне опалення, системи затінення, москітні сітки, базова автоматизація клімату
6	Скляні промислові теплиці типу «антрацит», круглорічне вирощування (висота 6-7,5 м)	Високий	Автоматичне опалення, досвітка, фертигація, контроль ЕС/рН, часткова автоматизація розсадного відділу
7	Інноваційні теплиці голландського або ізраїльського типу (висота 7-9 м)	Дуже високий	Повна інтеграція систем керування: мікроклімат, полив, освітлення, SCADA, віддалений моніторинг, впроваджений III

Класифікація споруд закритого ґрунту

Висота і рівень технологічної оснащеності теплиці суттєво впливають на її продуктивність. Наприклад, при вирощуванні одного й того ж гібриду томату від компанії Seminis у теплицях різної висоти (2,5 м – до 25 кг/м², 3,5 м – до 30 кг/м², 5 м – до 50 кг/м², 7 м – до 80 кг/м²) спостерігалось чітке зростання врожайності. Це зумовлено покращенням умов мікроклімату, зокрема вентиляції, світлового режиму та об'єму повітря [13, 14].

Існують підходи до комплексної оцінки ефективності теплиць, які передбачають використання зважених факторів для формування інтегрального показника якості [15]. Однак, через відсутність чітких методів визначення вагових коефіцієнтів, вибір між альтернативами залишається суб'єктивним. У зв'язку з високою складністю проектування, зростає інтерес до віртуального моделювання [16, 17] або використання формальних математичних моделей [18]. Після класифікації за поколіннями та типами теплиць доцільно розглянути, які агротехнічні параметри слід контролювати в кожному з цих типів.

Агроцикл для вирощування культур

Кожна культура має свій цикл вирощування, основні параметри але вплив багатьох факторів якого відомі [19] з аграрних наук та навіть можуть мати статистичні моделі, проте часто потребують індивідуального визначення в кожному конкретному випадку, оскільки статистика та її моделі є загальні по своїм властивостям. Шляхом впливу на мікроклімат можна уповільнити або прискорити ріст продукції. Цей спосіб підійде для теплиць, де як правило уже є якась система керування

мікрокліматом, часто автоматизована[20]. В роботі [21] пропонується автоматизована система керування теплиці та формується інформаційна графова модель обміну повідомленнями у цій системі.

Вплив на мікроклімат можна здійснювати через керування освітленням, теплом, концентрацією CO_2 в повітрі, вологістю, потоком повітря, зрошуванням та внесенням добрив [22]. Більшість параметрів можна регулювати вимірюванням через датчики та впливом через відповідні виконавчі механізми [23]. Великі теплиці можуть мати ряди з тисячі рослин, тому вимірювання параметрів є розподіленим в просторі [24], а також у часі (з урахуванням росту рослин та їх циклу). Незважаючи на розвиток автоматизованих систем керування мікрокліматом, питання їхньої ефективної взаємодії та адаптації до потреб конкретних культур залишається відкритим.

Визначивши основні параметри мікроклімату, перейдемо до аналізу тих чинників, які ускладнюють їх ефективне регулювання

Виклики при керуванні мікрокліматом в теплиці

Одним із ключових викликів у керуванні мікрокліматом є підтримання оптимального балансу температури та вологості, що безпосередньо впливає на розвиток рослин, фотосинтез, ризики захворювань та врожайність. Через коливання цих параметрів у теплиці можуть виникати умови, близькі до конденсації вологи, особливо коли температура повітря наближається до точки роси.

На рисунку 1 показано приклад зміни температури в теплиці та відповідної точки роси. Якщо температура в теплиці опускається до рівня точки роси, волога з повітря починає конденсуватися на поверхнях. Це створює серйозні ризики – утворення крапель на листках, стелі, конструкціях, що призводить до:

- розвитку грибкових та бактеріальних хвороб (ботритис, фітофтора, мучниста роса),
- гниття плодів і листя,
- перезволоження субстрату через стікання конденсату,
- корозії металевих конструкцій та утворення плісняви на укривних матеріалах.

Висока відносна вологість (>90%) також уповільнює транспірацію рослин – процес випаровування води, що є критичним для поглинання CO_2 . При уповільненій транспірації фотосинтез сповільнюється, що безпосередньо гальмує ріст культури.

Підтримка дефіциту тиску водяної пари (VPD) у межах 0.8-1.5 кПа є ефективним способом запобігання цим проблемам. Задля цього тепличні господарства використовують:

- вентиляцію (кватирки, вентилятори),
- терморегулятори та теплові екрани,
- осушувачі повітря,
- контроль за різницею температури вдень і вночі.

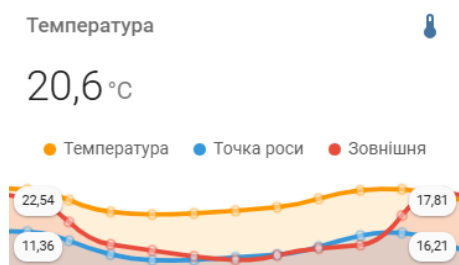


Рис. 1. Добовий графік зміни температури назовні та всередині та точки роси

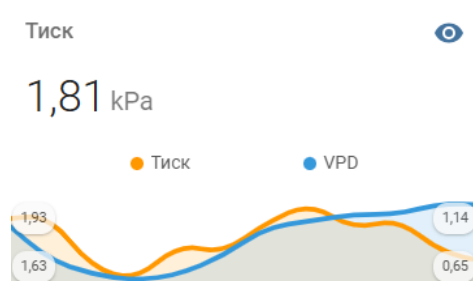


Рис. 2. Добовий графік зміни атмосферного тиску та тиску водяної пари в теплиці

На рисунку 2 показано зміну атмосферного тиску та тиску водяної пари у тепличному середовищі. Коли точка роси наближається до фактичної температури повітря, система має негайно відреагувати, інакше наслідки можуть бути незворотними.

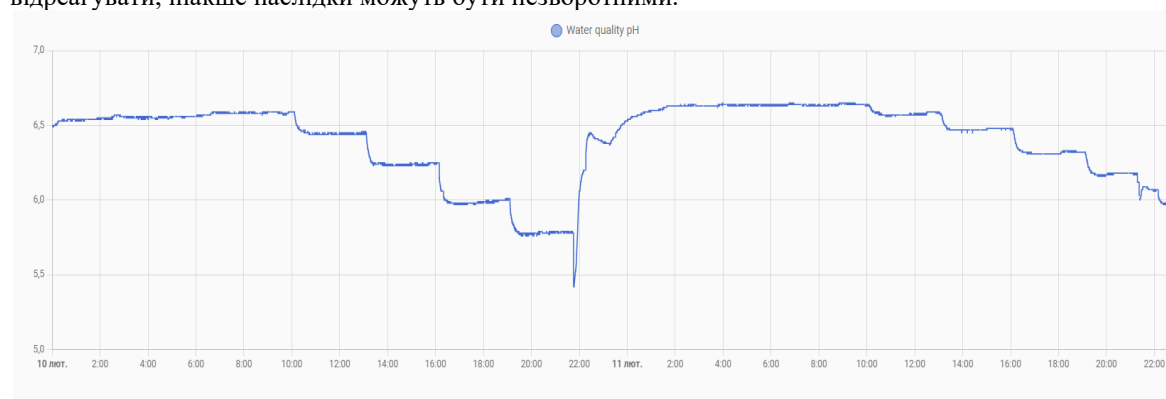


Рис. 3. Графік pH теплиці протягом двох діб

Окрім параметрів мікроклімату, важливо також контролювати стан поживного середовища, зокрема кислотність (pH) поливного розчину, яка безпосередньо впливає на засвоєння елементів живлення і розвиток рослин. На рисунку 3 показано зміну pH у гідропонній системі протягом двох діб. Якщо не реагувати вчасно на ці зміни, рослини можуть зазнати фізіологічного стресу, що призведе до зниження якості продукції або втрати врожаю.

Додатково, важливим обмеженням є енергетична вартість обігріву. На сьогодні опалення професійної теплиці площею 500 м² коштує майже стільки ж, як і сама конструкція теплиці. Через це більшість виробників зменшують опалювальні площі, обмежуючись лише розсадними відділами або обігрівом вночі [26].

Ще один суттєвий виклик — нестача кваліфікованого персоналу, який здатен правильно інтерпретувати показники мікроклімату (точка роси, VPD, pH) та застосовувати заходи управління. У багатьох випадках керування здійснюється інтуїтивно, без аналізу ефективності, що призводить до систематичних помилок:

- неправильне поєднання обігріву з вентиляцією та освітленням,
- нерівномірне зволоження,
- запізнена реакція на зміну мікроклімату або стану ґрунту.

Рішенням цих проблем є підвищення кваліфікації персоналу, впровадження зрозумілих візуалізованих систем контролю, режимів поливу та періодичного аудиту стану теплиці.

Всі параметри мікроклімату взаємопов'язані. Зміна одного (наприклад, температури) неминуче впливає на інші (вологість, VPD, pH). Саме тому ефективне управління потребує системного підходу.

Взаємозв'язок параметрів мікроклімату

Після узагальнення загальних закономірностей мікроклімату переходимо до прикладу застосування цих знань. Полуниця, завдяки своїй чутливості до змін температури та вологості, є ідеальною культурою для демонстрації оптимальних параметрів у тепличних умовах.

Типові параметри мікроклімату теплиці для полуниці показані в таблиці 2 [27]. Таблиця 2 допоможе аналізувати взаємозв'язки параметрів мікроклімату та передбачати їх зміни при автоматизації управління теплицею. На основі даних залежностей можна розробляти модель керування мікрокліматом в теплиці та впливати на арготцикл.

Таблиця 2

Залежності між параметрами мікроклімату теплиці

ПАРАМЕТР	1. Температура	2. Вологість	3. Тиск водяної пари	4. Дефіцит тиску водяної пари	5. CO ₂	6. Розчин (TDS)	7. Сила світлового потоку (PAR)	8. Точка роси
1. Температура	—	↑ при випаровуванні, ↓ при конденсації	↑	↑ при низькій вологості, ↓ при високій	Незначний вплив	Незначний вплив	↑ (якщо світло спричиняє нагрів)	↑
2. Вологість	↓ при нагріванні, ↑ при охолодженні	—	↑	↓	Незначний вплив	Незначний вплив	Незначний вплив	↑
3. Тиск водяної пари	↑	↑	—	↓	Незначний вплив	Незначний вплив	Незначний вплив	↑
4. Дефіцит тиску водяної пари	↑	↓	↓	—	Незначний вплив	Незначний вплив	Незначний вплив	↓
5. CO ₂	Незначний вплив	Незначний вплив	Незначний вплив	Незначний вплив	—	↑ (через утворення вугільної кислоти)	↑ (якщо підсилює фотосинтез)	Незначний вплив
6. Розчин (TDS)	Незначний вплив	Незначний вплив	Незначний вплив	Незначний вплив	↑ (при розчиненні CO ₂)	—	Незначний вплив	Незначний вплив
7. Сила світлового потоку PAR	↑ (при тривалому освітленні)	Незначний вплив	Незначний вплив	Незначний вплив	↑ (при підвищенні фотосинтезу)	Незначний вплив	—	Незначний вплив
8. Точка роси	↑	↑	↑	↓	Незначний вплив	Незначний вплив	Незначний вплив	—

*«Незначний вплив» — залежність є, але вплив мінімальний у стандартних умовах.

На рисунку 4 представлено діаграму, що ілюструє взаємозв'язки між ключовими параметрами мікроклімату теплиці – температурою, відносною вологістю, дефіцитом тиску водяної пари (VPD), концентрацією CO₂ та рівнем освітлення (PAR). Діаграма демонструє, як зміна одного параметра впливає на інші, і може бути використана для побудови алгоритмів автоматизованого управління мікрокліматом.

UML-діаграма на рисунку 5 відображає основні стадії росту ремонтантної полуниці, включаючи повторний цикл після завершення плодоношення. Вимоги культури до умов вирощування – це в першу чергу вимоги до температури, світла, вологості, мінерального живлення, кислотності, засоленості, щільності ґрунту.

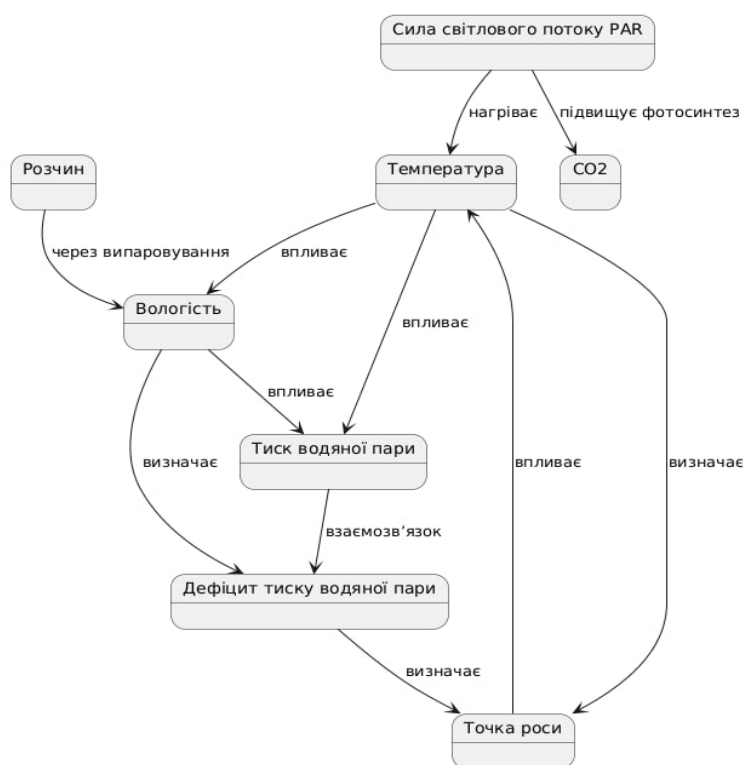


Рис. 4. Діаграма взаємозв'язку між ключовими параметрами мікроклімату теплиці

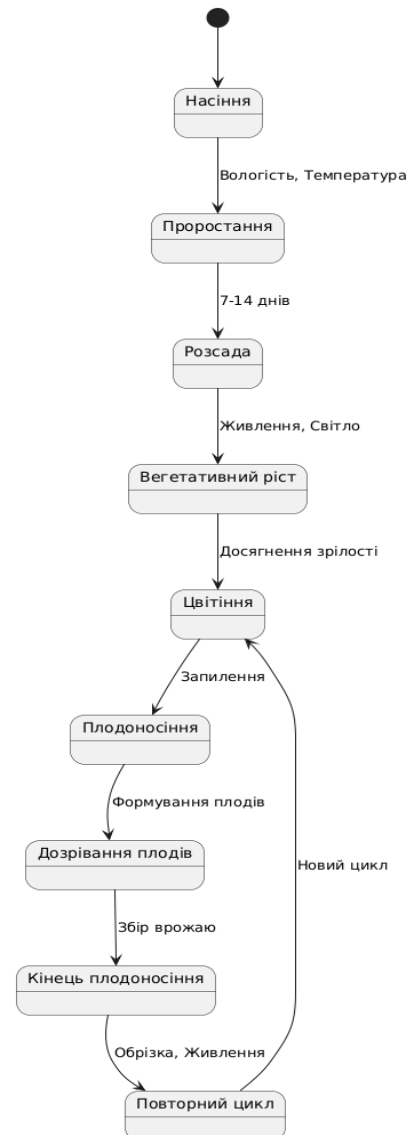


Рис. 5. UML-діаграма стадій росту полуниці

Таблиця 3 [28] враховує типові добові коливання температури, вологості та освітлення для ідеальних умов вирощування полуниці на кокосовому субстраті.

Пояснення:

- Температура підвищується від нагрівачів та освітлення, знижується при охолодженні повітря. Визначає швидкість метаболізму, фотосинтезу, дихання.
- Вологість зростає при роботі зволожувача та насоса поливу, зменшується осушувачем та вентиляцією.
- Тиск водяної пари змінюється разом із вологістю.
- Дефіцит тиску водяної пари (VPD) зростає при нагріванні, зменшується при зволоженні.
- CO₂ підвищується при роботі джерела CO₂ та знижується вентиляцією.
- pH розчину регулюється pH UP та pH DOWN.
- TDS розчину зростає при внесенні добрив через насос.

- Освітленість (PAR) змінюється лише від освітлення.
- Точка роси підвищується при збільшенні температури або вологості та знижується при охолодженні та вентиляції.

Таблиця 3

Ідеальні умови вирощування полуниці на кокосовому субстраті

ГОДИНА/ ПАРАМЕТР	Темпе- ратура (°C)	Вологість (%)	Тиск водяної пари (kPa)	Дефіцит тиску водяної пари (kPa)	CO ₂ (ppm)	PAR (μmol/m ² /s)	Точка роси (°C)
00:00 - 03:00	17	85	1.90	0.40	450	0	14.5
03:00 - 06:00	16.5	87	1.20	0.30	400	0	14.0
06:00 - 09:00	19	85	1.60	0.40	450	200	14.8
09:00 - 12:00	23	75	1.80	0.80	550	1000	15.2
12:00 - 15:00	26	60	2.1	1.30	700	1500	16.5
15:00 - 18:00	26.5	58	2.2	1.35	700	1600	16.8
18:00 - 21:00	23	70	2.00	1.00	600	800	15.5
21:00 - 24:00	18	85	1.80	0.40	450	0	14.5

Таблиця 4 впливу пристроїв керування мікрокліматом на параметри середовища. "+" означає збільшення параметра, "-" означає зменшення, "±" – можливий варіативний вплив.

Таблиця 4

Залежність впливу приладів теплиці на параметри мікроклімату [17]

ПАРАМЕТР / ПРИСТРІЙ	Нагрівач повітря	Нагрі- вач грунту	Зво- ложу- вач	Осу- шувач	Дже- рело CO ₂	Насос поливу розчи- ном	pH UP	pH DOWN	Охоло- дження повітря	Вен- тиля- ція	Освіт- лення
1. Температура (°C)	+	+	±	+	0	0	0	0	-	±	+
2. Вологість (%)	-	0	+	-	0	+	0	0	±	-	+
3. Тиск водяної пари (kPa)	-	0	+	-	0	+	0	0	±	-	+
4. Дефіцит тиску водяної пари (kPa)	+	0	-	+	0	-	0	0	±	+	-
5. CO ₂ (ppm)	0	0	0	0	+	0	0	0	0	-	0
6. pH розчину	0	0	0	0	0	0	+	-	0	0	0
7. TDS розчину (ppm)	0	0	0	0	0	+	+	+	0	0	0
8. PAR (μmol/m ² /s)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+
9. Точка роси (°C)	+	0	+	-	0	+	0	0	-	-	+

Після детального розгляду загальних параметрів мікроклімату й аналізу їх взаємозв'язків, на цьому етапі доцільно зосередитися на конкретному прикладі культури з високими вимогами до умов вирощування. Розглянемо оптимальні параметри для полуниці – однієї з найчутливіших культур у тепличному господарстві.

Таблиця 5 [28] містить оптимальні параметри мікроклімату для ремонтантної полуниці на різних стадіях агроциклу.

Таблиця 5

Типові параметри мікроклімату для різних етапів росту рослини

СТАДІЯ/ ПАРАМЕТР	Темпе- ратура (°C)	Воло- гість (%)	Тиск водяної пари (кПа)	Дефіцит тиску водяної пари (кПа)	CO ₂ (ppm)	pH розчину	TDS розчину (ppm)	PAR (μmol/m ² /s)	Точка роси (°C)
Проростання	22-26	5-95	1.2-1.5	0.2-0.4	800-1000	5.8-6.2	400-600	100-200	20-24
Розсада	18-22	5-85	1.0-1.3	0.3-0.6	900-1200	5.8-6.2	600-800	200-400	16-20
Вегетативний ріст	18-24	0-80	0.8-1.2	0.5-0.9	1000- 1200	6.0-6.2	800- 1000	400-600	14-18
Цвітіння	20-26	5-75	0.7-1.1	0.7-1.2	1000- 1300	6.0-6.2	1000- 1200	600-800	12-16
Плодоносінн я	22-28	0-70	0.6-1.0	1.0-1.5	1200- 1500	6.0-6.2	1200- 1400	800-1000	10-14
Дозрівання плодів	20-26	5-65	0.5-0.9	1.2-1.8	1200- 1500	6.0-6.2	1400- 1600	800-1000	8-12
Кінець плодоносіння	18-24	60- 70	0.6-1.0	1.0-1.5	1000- 1300	6.0-6.2	1000- 1200	600-800	10-14
Наступний цикл	22-26	5-95	1.2-1.5	0.2-0.4	800-1000	5.8-6.2	400-600	100-200	20-24

З огляду на виявлені залежності між параметрами мікроклімату й особливості вирощування різних культур, зокрема полуниці, доцільно окреслити ключові висновки й напрями подальшої роботи. Багато фермерів не до кінця усвідомлюють або задовольняють ці вимоги культури, й відповідно мають невисокі врожаї.

Висновки

У результаті проведеного огляду встановлено, що ефективне управління умовами мікроклімату в теплицях є ключовим фактором для забезпечення високої продуктивності та якості вирощуваних культур. Систематизація типів теплиць за поколіннями дозволяє краще розуміти еволюцію конструктивних і технологічних рішень, що впливають на можливості автоматизації процесів вирощування.

Аналіз агроциклу вирощування показав, що на різних стадіях розвитку рослин критично важливо контролювати специфічні параметри середовища – температуру, вологість повітря та ґрунту, концентрацію CO₂, освітленість та фотоперіод. Виявлені взаємозв'язки між цими параметрами демонструють складність завдання з одночасного досягнення оптимальних умов.

Застосування IoT-технологій та автоматизації сприяє не лише зниженню витрат на електроенергію, воду та добрива, але й мінімізує ризики, пов'язані з нестабільними погодними умовами. Для культур із різним циклом росту (коротким і довгим) автоматизовані системи забезпечують індивідуальні методи управління, що дозволяє досягати оптимальних умов для кожного етапу розвитку рослин. Одним із перспективних напрямів є прогнозування стану рослин, що дозволяє не тільки коригувати умови вирощування, але й оптимізувати логістику та продаж врожаю.

Таким чином, проведений огляд досліджень підтверджує актуальність розробки комплексної системи управління агроциклом у теплицях. Урахування викликів та можливостей, зазначених у статті, дозволить сформувати більш адаптивний і стійкий підхід до вирощування культур у контрольованому середовищі.

Подальші дослідження можуть бути зосереджені на: аналізі основних викликів, що стоять перед впровадженням III у теплиці, серед яких необхідність точного моделювання агроциклів; аналізі підходів до автоматизації тепличного господарства, зокрема використання IoT, сенсорних систем та алгоритмів машинного навчання для моніторингу та регулювання мікроклімату; інтеграції автоматизованих рішень для оптимізації агроциклу за декількома параметрами одночасно, такими як: зменшення витрат ресурсів, збільшення урожайності, отримання продукції з заданими смаковими якостями та без перебільшення рівня нітратів; розробці нейромережових моделей що у поєднанні з комп'ютерним зором та методами глибокого навчання дозволяють автоматизувати процеси контролю за станом рослин та мікрокліматом у теплиці.

References

1. De Pascale S. Sustainable protected cultivation at a mediterranean climate. Perspectives and challenges [Electronic resource] / S. De Pascale, A. Maggio // *Acta Horticulturae*. – 2005. – No. 691. – P. 29–42. – Mode of access: <https://doi.org/10.17660/actahortic.2005.691.1> (date of access: 22.06.2025).
2. Stanghellini C. Enhancing environmental quality in agricultural systems [Electronic resource] / C. Stanghellini, F. L. K. Kempkes, P. Knies // *Acta Horticulturae*. – 2003. – No. 609. – P. 277–283. – Mode of access: <https://doi.org/10.17660/actahortic.2003.609.41> (date of access: 22.06.2025).
3. Experiences in cultivation inside the watery prototype of a closed greenhouse for semi-arid regions [Electronic resource] / G. Zaragoza [et al.] // *Acta Horticulturae*. – 2008. – No. 801. – P. 773–780. – Mode of access: <https://doi.org/10.17660/actahortic.2008.801.90> (date of access: 22.06.2025).
4. Advances in greenhouse automation and controlled environment agriculture: A transition to plant factories and urban agriculture [Electronic resource] / Redmond Ramin Shamshiri [et al.] // *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. – 2018. – Vol. 11, no. 1. – P. 1–22. – Mode of access: <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20181101.3210> (date of access: 22.06.2025).
5. Nuraeni W. Kontrol dan monitoring otomatis rumah kaca untuk buah strawberry [Electronic resource] / Widy Nuraeni, Eka Dwi Nurcahya, Didik Riyanto // *komputek*. – 2019. – Vol. 3, no. 2. – P. 35. – Mode of access: <https://doi.org/10.24269/jkt.v3i2.258> (date of access: 22.06.2025).
6. Nurzyński J. The yielding of greenhouse tomato grown in straw and rockwool substrates [Electronic resource] / J. Nurzyński // *Folia Horticulturae*. – 2006. – Vol. 18. – P. 17–23. – Mode of access: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:82088793>.
7. Leila Ebralidze. The intensive technology of growing strawberries under cover [Electronic resource] / Leila Ebralidze, Shota Lominadze // *World Science*. – 2022. – No. 2(74). – Mode of access: https://doi.org/10.31435/rsglobal_ws/28022022/7775 (date of access: 22.06.2025).
8. Maraveas C. Incorporating Artificial Intelligence Technology in Smart Greenhouses: Current State of the Art [Electronic resource] / Chrysanthos Maraveas // *Applied Sciences*. – 2022. – Vol. 13, no. 1. – P. 14. – Mode of access: <https://doi.org/10.3390/app13010014> (date of access: 22.06.2025).
9. AI Controlled Smart IoT Based Greenhouse Monitoring System [Electronic resource] / Harisha Aa [et al.], – [S. l.], 2024. – P. 434–439. – Mode of access: <https://doi.org/10.1109/DISCOVER62353.2024.10750624>.
10. Greenhouse Automation Using Wireless Sensors and IoT Instruments Integrated with Artificial Intelligence [Electronic resource] / Redmond R. Shamshiri [et al.] // *Next-Generation Greenhouses for Food Security* / ed. by R. R. Shamshiri. – Rijeka, 2021. – Mode of access: <https://doi.org/10.5772/intechopen.97714>.
11. Overview of Closed-Loop Control Systems and Artificial Intelligence Utilization in Greenhouse Farming [Electronic resource] / Dominik Walczuch [et al.] // *2022 IEEE International Conference on Omni-layer Intelligent Systems (COINS)*. – [S. l.], 2022. – P. 1–6. – Mode of access: <https://doi.org/10.1109/COINS54846.2022.9854938>.
12. Advances in greenhouse automation and controlled environment agriculture: a transition to plant factories and urban agriculture [Electronic resource] / Redmond Ramin Shamshiri [et al.] // *International journal of agricultural and biological engineering*. – 2018. – Vol. 11, no. 1. – P. 1–22. – Mode of access: <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20181101.3210> (date of access: 22.06.2025).
13. Velychko N. Onlain-kurs dlia studentiv ta vykladachiv «Suchasne ovochivnytstvo» - Proiekt USAID Ekonomichna pidtrymka Ukrainy [Elektronnyi resurs] / Nataliia Velychko // *Proiekt USAID Ekonomichna pidtrymka Ukrainy*. – Rezhym dostupu: <https://era-ukraine.org.ua/onlayn-kurs-dlia-studentiv-ta-vykladachiv-suchasne-ovochivnytstvo/> (data zvernennia: 22.06.2025).
14. Greenhouse technology and management [Electronic resource] / ed. by N. Castilla. – Wallingford : CABI, 2013. – Mode of access: <https://doi.org/10.1079/9781780641034.0000> (date of access: 22.06.2025).
15. Basalkevych O. A. Vyznachennia optymalnoi konfihuratsii intelektualnoi teplytsi za dopomohoiu adytyvnoi, multiplykatyvnoi, minimaksnoi ta maksymynnoi zghortok," in *Proc. of ACIT2015 (Materialy V Vseukrainskoi shkoly-seminaru molodykh vchenykh i studentiv Suchasni kompiuterni informatsiini tekhnolohii)*, Ternopil: TNEU [Elektronnyi resurs] / O. A. Basalkevych // *Suchasni kompiuterni informatsiini tekhnolohii : Materialy V Vseukr. shk.-seminaru molodykh vchen. i studentiv ASIT2015*. – Ternopil, 2015. – S. 12–13. – Rezhym dostupu: https://acit.tech/Download/Tezy_ACIT2015.pdf.
16. A Systematic Review of Optimal and Practical Methods in Design, Construction, Control, Energy Management and Operation of Smart Greenhouses [Electronic resource] / Mohammad Ghiasi [et al.] // *IEEE Access*. – 2023. – P. 1. – Mode of access: <https://doi.org/10.1109/access.2023.3346436> (date of access: 22.06.2025).
17. Lacroix R. A framework for the design of simulation-based greenhouse control [Electronic resource] : dissertation / Lacroix René. – Montréal, 1994. – 386 p. – Mode of access: <https://dam-oclc.bac-lac.gc.ca/download?id=31b210b3-203e-45aa-8646-1f247be68599&fileName=2514nm99q.pdf>.
18. Bishop S. *Mathematical Models in Agriculture. Quantitative Methods for the Plant, Animal and Ecological Sciences*, 2nd edn. Eds J. H. M. Thornley & J. France. 906 pp. Wallingford, UK: CABI (2007). £150.00 (Hardback). ISBN 0 85199 010 X. [Electronic resource] / STEPHEN BISHOP // *The Journal of*

Agricultural Science. – 2008. – Vol. 146, no. 2. – P. 235-235. – Mode of access: <https://doi.org/DOI:%2010.1017/S0021859608007788>.

19. Patterson H. D. Mathematical Models in Agriculture. By J. France and J. H. M. Thornley. London: Butterworth (1984), pp. 335, £35. [Electronic resource] / H. D. Patterson // Experimental Agriculture. – 1985. – Vol. 21, no. 1. – P. 79. – Mode of access: <https://doi.org/10.1017/s0014479700012291> (date of access: 22.06.2025).

20. Avtomatyzovane keruvannia protsesom vyroshchuvannia tomativ u teplytsiakh z prohnozuvanniam zovnishnikh pryrodnykh zburen: avtoref. dys. kand. tekhn. nauk: 05.13.07 / A. O. Dudnyk; Nats. un-t kharch. tekhnolohii. – Kyiv, 2014. – 22 s.

21. Sharapa O. V. Model of process control system in greenhouse agro-industrial complex [Electronic resource] / Oleksandr V. Sharapa, Anatoly G. Berdnikov // 47. – 2020. – No. 47. – P. 86–92. – Mode of access: <https://doi.org/10.26565/2304-6201-2020-47-08> (date of access: 22.06.2025).

22. Control and Automation: Insmoaf (Integrated Smart Modern Agriculture and Fisheries) on The Greenhouse Model [Electronic resource] / Ridwan Siskandar [et al.] // Jurnal Ilmu Pertanian Indonesia. – 2022. – Vol. 27, no. 1. – Mode of access: <https://doi.org/10.18343/jipi.27.1.141> (date of access: 22.06.2025).

23. Avtomatyzatsiia protsesiv keruvannia teplychnymy kompleksamy z monitorynhom yakosti produktsii: avtoref. dys. d. t. n. : 05.13.07 – Avtomatyzatsiia protsesiv keruvannia / I. M. Bolbot: Natsionalnyi universytet bioresursiv i pryrodokorystuvannia Ukrainy. – 2020 – 49 s.

24. Kashkarov A. O. Vyznachennia rozpodilenykh parametriv temperatury karkasnykh teplyts // Enerhetyka ta kompiuter.-intehr. tekhnolohii v APK. – 2017. – № 1.

25. A Dew-Condensation Sensor Exploiting Local Variations in the Relative Refractive Index on the Dew-Friendly Surface of a Waveguide [Electronic resource] / Subin Hwa [et al.] // Sensors. – 2023. – Vol. 23, no. 5. – P. 2857. – Mode of access: <https://doi.org/10.3390/s23052857> (date of access: 22.06.2025).

26. Maraveas C. Incorporating Artificial Intelligence Technology in Smart Greenhouses: Current State of the Art [Electronic resource] / Chrysanthos Maraveas // Applied Sciences. – 2022. – Vol. 13, no. 1. – P. 14. – Mode of access: <https://doi.org/10.3390/app13010014> (date of access: 22.06.2025).

27. Ozguven M. The Digital Age in Agriculture [Electronic resource] / Mehmet Ozguven. – 2023. – Mode of access: <https://doi.org/10.1201/b23229>.