

Міністерство освіти і науки України  
Сумський державний університет  
Кафедра комп'ютеризованих систем управління

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри КСУ

\_\_\_\_\_ П. В. Леонт'єв

« \_\_\_\_\_ » 2023 р.

### **КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА**

зі спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

**РЕСУРСОЗБЕРЕЖНЕ КЕРУВАННЯ ПАРАМЕТРАМИ МІКРОКЛІМАТУ  
ТЕПЛИЧНОГО ГОСПОДАРСТВА / RESOURCE-SAVING CONTROL OF  
GREENHOUSE MICROCLIMATE PARAMETERS**

Здобувач ступеня магістра

студент гр. СУ.мз-13с

С.В. Соколов

Керівник роботи

к.т.н., доцент

О.Ю. Журавльов

Суми – 2023

## **РЕФЕРАТ**

Соколов Сергій Вікторович. Ресурсозбережне керування параметрами мікроклімату тепличного господарства. Кваліфікаційна робота магістра. Сумський Державний Університет, Суми, 2023 р.

Робота містить 119 сторінок основного тексту, 52 рисунки, 2 таблиці; список використаних джерел з 28 найменувань.

Робота присвячена дослідженню системи керування параметрами мікроклімату тепличного господарства. Запропоновані рішення дають можливість зменшити витрати вуглецевого газу та електроенергії в процесі вирощування тепличних культур.

Ключові слова: тепличне господарство, математична модель, вуглецевий газ, освітленість, Matlab, SCADA.

## **ABSTRACT**

Sokolov Serhii Viktorovich. Resource-saving control of greenhouse microclimate parameters. Qualification work of the master. Sumy State University, Sumy, 2023.

The work contains 119 pages of the main text, 52 figures, 2 tables; list of used sources from 28 names.

The work is devoted to the research of the microclimate control system of the greenhouse economy. The proposed solutions make it possible to reduce the consumption of carbon dioxide and electricity in the process of growing greenhouse crops.

Key words: greenhouse, mathematical model, carbon dioxide, lighting, Matlab, SCADA.

Міністерство освіти і науки України  
Сумський державний університет  
Кафедра комп'ютеризованих систем управління

ЗАТВЕРДЖУЮ:  
Зав. кафедри КСУ  
\_\_\_\_\_ П. В. Леонтєв  
« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2023 р.

ЗАВДАННЯ  
на кваліфікаційну роботу магістра

Тема роботи: Ресурсозбережне керування параметрами мікроклімату тепличного господарства. Затверджено наказом ректора університету №

Термін подання закінченої роботи 15.02.2023 р.

Вихідні дані до роботи: завдання кафедри, технічна документація, джерела інформації відкритого доступу.

Зміст роботи: контури системи керування параметрами мікроклімату тепличного господарства, обладнання для генерування вуглецевого газу, мікрокліматична модель, математична модель росту рослини, імітаційна модель системи керування мікрокліматом теплиці, SCADA, Дослідження роботи: системи регулювання концентрацією CO<sub>2</sub> та освітленістю теплиці.

Календарний план

Номер етапу	Зміст етапу проектування	Терміни виконання
1	Аналіз завдання кафедри. Підбір та аналіз літератури	01.10.2022 – 20.10.2022
2	Аналіз параметрів мікроклімату та систем керування тепличного господарства	21.10.2022 – 15.11.2022
3	Аналіз математичних моделей тепличних господарств	16.11.2022 – 20.12.2022
4	Імітаційне моделювання системи керування параметрами мікроклімату тепличного господарства. Дослідження роботи системи регулювання концентрацією CO <sub>2</sub> та освітленістю теплиці	21.12.2022 – 10.01.2023
5	Створення SCADA системи керування параметрами мікроклімату тепличного господарства	11.01.2023 – 09.02.2023
6	Технічне оформлення кваліфікаційної роботи та її презентації. Перевірка на відсутність плагіату. Подання роботи до захисту	10.02.2023– 18.02.2023

Дата видачі завдання «01» 10. 2022 р.

Керівник роботи:  
к. т. н., доцент

Журавльов О. Ю.

До виконання прийняв:  
студент групи СУ.мз-13с

Соколов С. В.

## ЗМІСТ

	С.
СПИСОК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	6
ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1 ПАРАМЕТРИ МІКРОКЛІМАТУ ТА ТИПИ ТЕПЛИЦЬ.....	11
1.1 Всесвітня статистика використання тепличних господарств.....	11
1.2 Переваги автоматизації теплиць.....	13
1.3 Процеси, що піддаються автоматизації й роботизації в тепличному господарстві.....	16
1.3.1 Автоматизація охолодження теплиці.....	17
1.3.2 Автоматизація опалення теплиці.....	20
1.3.3 Автоматизація освітлення теплиці.....	21
1.3.4 Автоматизація поливу.....	23
1.3.5 Автоматизація запилення рослин.....	25
1.3.6 Автоматизація збору врожаю.....	27
1.4 Система керування параметрами мікроклімату теплиці.....	29
РОЗДІЛ 2 ВИХІДНІ ПОЛОЖЕННЯ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	33
2.1 Постановка завдання дослідження.....	33
2.2 Вплив вуглецевого газу на рост рослин.....	34
2.3 Способи отримання вуглецевого газу.....	42
2.4 Зв'язок концентрації вуглецевого газу з іншими параметрами мікроклімату теплиці.....	52
РОЗДІЛ 3 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПАРАМЕТРАМИ МІКРОКЛІМАТУ ТЕПЛИЧНОГО ГОСПОДАРСТВА.....	56
3.1 Обґрунтування математичної моделі тепличного господарства.....	56
3.2 Аналіз математичних моделей тепличних господарств.....	60
3.3 Математична модель системи «параметри мікроклімату – ріст рослини».....	65
3.3.1 Вимоги до математичної моделі.....	65

3.3.2	Модель енергетичного балансу.....	66
3.3.3	Модель балансу водяної пари.....	74
3.3.4	Модель балансу вуглецевого газу.....	80
3.3.5	Модель росту.....	84
3.3.6	Оціночні розрахунки параметрів моделі росту.....	91
4	ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПАРАМЕТРАМИ МІКРОКЛІМАТУ ТЕПЛИЧНОГО ГОСПОДАРСТВА.....	94
4.1	Обґрунтування імітаційної моделі системи керування.....	94
4.2	Модель системи керування концентрацією вуглецевого газу.....	95
4.3	Модель системи керування освітленням теплиці.....	104
4.4	Вибір обладнання та SCADA система моніторингу параметрів мікроклімату теплиці.....	110
	ВИСНОВКИ.....	115
	СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	116

## СПИСОК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

КНР – Китайська Народна Республіка;

ПІД – пропорційно-інтегрально-деференційний;

США – Сполучені Штати Америки;

ШІМ – широтно-імпульсна модуляція;

CO<sub>2</sub> – вуглецевий газ;

GPIO – інтерфейс введення / виведення загального призначення;

pH – водневий показник або показник кислотності;

ppm – частка на мільйон;

SCADA – диспетчерське управління й збір даних;

SPI – послідовний периферійний інтерфейс;

USB – універсальна послідовна шина.

## ВСТУП

Збільшення населення на Земній кулі призводить до збільшення попиту на продукти харчування. Використання лише природних умов для вирощування рослин стає недостатнім. Тому все більш актуальною є проблема вирощування сільськогосподарських культур у штучних умовах, таких як камери та теплиці, що забезпечує не лише можливість вирощування екзотичних культур, але й захистити рослини від несприятливих зовнішніх кліматичних умов в зимовий та весняний період. Крім того, створення сприятливих умов для рослин під час використання тепличного господарства сприяє не лише збільшенню врожайності сільськогосподарських культур, але й впливає на їх якість. Таке покращення росту рослин обумовлюється підтриманням певних параметрів мікроклімату теплиці.

Незважаючи на переваги тепличного господарства для вирощування рослин, треба враховувати і економічну доцільність створення теплиць, що обумовлюється й ціною на сільськогосподарську продукцію. Тому найкраще вирощувати у тепличних господарствах такі культури, які мають гарний ринковий попит та дають найкращі економічні показники прибутку. Зрозуміло, що доцільність створення тепличного господарства повинна базуватися на компромісі між витратами на побудову та експлуатацію теплиці й економічною віддачою від продажу врожаю.

Отже, економічні питання доцільності вирощування сільськогосподарських культур залежать від економічних показників кон'юнктури ринку. Ми зупинимося на технічних аспектах аналізу створення і дослідження тепличних господарств.

Типовим завданням інженерії садівництва є завдання оптимального керування параметрами мікроклімату теплиці. Таке завдання повинно ґрунтуватися не на інтуїції та на результатах, отриманих з багаточисельних експериментів під час вирощування рослин, а спиратися на певні положення наукові теорії оптимізації.

Саме застосування теорії оптимального управління дає можливість визначити стратегії керування параметрами мікроклімату тепличного господарства. В той же час

розглядати керування параметрами клімату теплиці треба на підставі моделі еволюції врожаю певної культури в часі як функції клімату, створеного всередині теплиці для вирощування певної рослини. Під час розроблення таких моделей треба чітко розуміти біологічні процеси, що відбуваються у рослині.

Оптимізація параметрів мікроклімату тепличного господарства є актуальною темою всесвітнього наукового товариства вже майже півстоліття. Незважаючи на те, що до параметрів мікроклімату теплиць відносять температуру та вологість повітря, вологість ґрунту, освітленість, концентрацію вуглецевого газу  $\text{CO}_2$  у повітрі теплиці, кислотність ґрунту рН тощо, головним чином дослідження проводилися для оптимізації температури та вологості. Варто зазначити, що ріст рослин відбувається за рахунок процесу фотосинтезу, який являє собою хімічну реакцію утворення цукрів з вуглецевого газу та води під дією світла. Така реакція відбувається у листях рослин, які є наче маленькими «хімічними заводами». Інтенсивність утворення цукрів залежить від декількох факторів, в тому числі й від виду рослини, площі її листів тощо.

Найчастіше кількість вуглецевого газу в теплиці підтримують сталим, а освітлення в теплиці вмикають залежно від часу доби. Таке керування призводить до втрат як енергії, витраченої на освітлення, так і до надлишкової витрати вуглецевого газу. Дослідження в цій роботі показали, що можна значно зменшити матеріальні й енергетичні витрати за рахунок керованої подачі  $\text{CO}_2$  та освітлення теплиці.

Виходячи с вищесказаного можна поставити мету та завдання роботи.

**Метою роботи** є ресурсозбережне керування такими параметрами мікроклімату тепличного господарства як витрати вуглецевого газу та освітленість теплиці.

Для досягнення поставленої мети були поставленні такі **завдання**:

- 1) аналіз впливу концентрації вуглецевого газу на масу рослини;
- 2) математичне моделювання мікроклімату теплиці та еволюції рослини;
- 3) виявлення критеріїв оптимальності параметрів мікроклімату для росту рослини;



4) імітаційне моделювання системи автоматичного керування, що реалізує оптимальне співвідношення концентрації CO<sub>2</sub> та освітленості теплиці;

5) створення SCADA системи керування параметрами мікроклімату тепличного господарства.

**Об'єктом дослідження** є система автоматичного керування, що реалізує оптимальне співвідношення концентрації CO<sub>2</sub> та освітленості теплиці.

**Предметом дослідження** є модель системи керування мікрокліматом тепличного господарства.

**Наукова новизна:**

– вперше запропонована математична модель, що описує оптимальне співвідношення між подаванням CO<sub>2</sub> та освітленістю теплиці з урахуванням температури та площі листів рослини;

– вперше зроблені оціночні розрахунки впливу показників, що входять до математичної моделі балансу еволюції рослини;

– набули подальшого розвитку відомі математичні моделі енергетичного балансу, балансу водяної пари та балансу вуглецевого газу;

– побудована та скорегована імітаційна модель системи керування, що реалізує ресурсозбережне керування концентрацією вуглецевого газу та освітленістю теплиці.

**Теоретична значимість:**

– запропановані власні математичні моделі енергетичного балансу, балансу водяної пари, балансу вуглецевого газу та балансу еволюції рослини, що є розвитком відомих моделей;

– проведені оціночні розрахунки параметрів моделі можуть бути використані для спрощення моделей параметрів теплиці;

– запропоноване рівняння для визначення оптимального співвідношення між концентрацією CO<sub>2</sub> та освітленістю теплиці може бути використане для оптимізації параметрів теплиці.

**Практична цінність:**

– оптимальне керування співвідношенням між подаванням CO<sub>2</sub> та освітленістю теплиці залежно від площі листя рослини зменшить матеріальні й енергетичні витрати на отримання врожаю, а підвищений вміст вуглецевого газу зменшить терміни вирощування тепличних культур. Для більш точних оцінок потрібні подальші економічні розрахунки.

## РОЗДІЛ 1 ПАРАМЕТРИ МІКРОКЛІМАТУ ТА ТИПИ ТЕПЛИЦЬ

### 1.1 Всесвітня статистика використання тепличних господарств

Зростання світового населення та збільшення попиту на харчові продукти призводить до розвитку індустрії виробництва теплиць. У сучасному сільському господарстві вирощування культур в теплиці займає важливе місце й упевнено збільшує свою частку. Аналіз використання теплиць у світі показав на стрімкий приріст доходів від продажу сільськогосподарської продукції, що, в свою чергу, викликане збільшенням продажу теплиць (рисунок 1.1). Якщо станом на 2014 рік світовий обсяг ринку теплиць складав лише приблизно 15 мільярдів доларів, то в 2022 році він збільшився вдвічі і перевищив відзначку у 31 мільярд доларів, що відображено на гістограмі 1.1.



Рисунок 1.1 – Обсяг світового ринку продаж теплиць

Але відбувається не лише збільшення кількості тепличних господарств, але й все частіше починають використовувати повністю автоматизовані теплиці. Теплиці, в яких керування параметрами мікроклімату і процесами вирощування здійснює автоматика, у всесвітньому товаристві прийнято називати розумними теплицями

(smart greenhouse). Так, ще в 2019 році ринок продажу повністю автоматизованих (розумних) теплиць становив 1,34 мільярди доларів, у 2020 році [1] – 1,54 мільярди доларів, то кожного року він показує зростання приблизно на 9,4% [1] – 11,4% [2]. Очікується [2], що в 2027 році він досягне позначки у 3,23 мільярди доларів.

Серед лідерів використання тепличних господарств є Європейський Союз, який займає 39% від усіх теплиць світу. Друге місце займають США (22%). Викликає здивування, що навіть КНР, яка має тропічний клімат, сприятливий для сільського господарства, завершує трійку лідерів країн, що найінтенсивніше використовують теплиці для вирощування рослин.

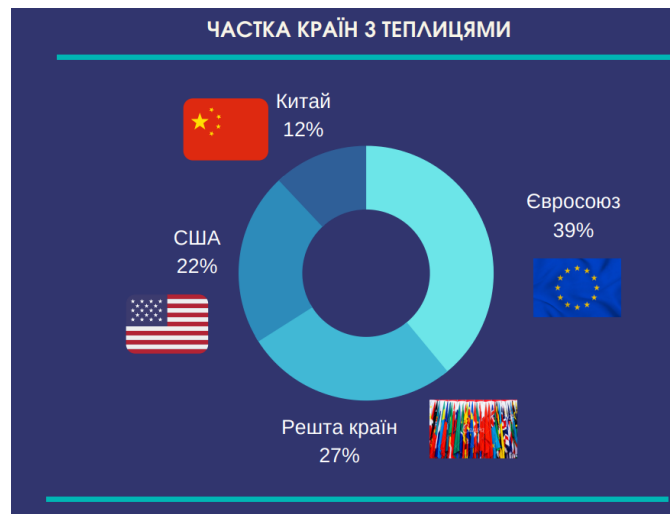


Рисунок 1.2 – Частка країн світу, що використовують теплиці в сільському господарстві

У більшості країн Європейського Союзу теплиці використовують для промислового вирощування квітів, рідше – овочів. Результати аналізу вирощування культур в тепличних господарствах [1] наведені на рисунку 1.3.

Але з кожним роком асортимент розширюється. Все частіше в тепличних господарствах можна побачити екзотичні дерева й рослини. Зовсім недавно з

прийняттям закону Європейського Союзу про вирощування медичного канабісу в теплицях в промислових масштабах почали вирощувати медичну марихуану.



Рисунок 1.3 – Статистичні данні асортименту культур, що вирощують у тепличних господарствах

## 1.2 Переваги автоматизації теплиць

Теплиці застосовують для запобігання впливу довкілля на розвиток рослин. Широке використання теплиць обумовлено тим, що для процвітання рослин існують оптимальні умови. Такі умови складно врахувати і створити у відкритому середовищі через зміну сонячного випромінення, кількості світла, зміну атмосферного тиску, наявності вітру, опадів, дощу, зміні відносної вологості тощо [3].

Рівень розвитку сучасної техніки є достатнім для створення автоматизованих теплиць. Автоматизація теплиць дає можливість збільшити врожайність рослин за рахунок більш точної підтримки оптимальних параметрів для рослин. Наприклад, під час поливу рослин вручну їх можна легко або полити недостатньо, або надмірно, що значною мірою вплине на врожай. Не автоматизований полив змушує людину не

тільки дотримуватися точного розкладу поливу, а й ураховувати вид рослини, її стадію росту, метод вирощування, тип ґрунту, метеорологічні параметри місцевості.

Під час автоматизованої системи керування мікрокліматом теплиці за рахунок використання датчиків можна здійснювати точний моніторинг вологості ґрунту і вчасно впливати на нього. Крім того дані вимірювання витрат води можна використати і для моніторингу споживання води протягом наступного періоду вирощування рослин в теплиці.

Це стосується й інших параметрів і факторів мікроклімату теплиці таких як:

- вентиляційні отвори;
- система опалення;
- система охолодження;
- система освітлення;
- температура повітря і ґрунту;
- концентрація вуглецевого газу у повітрі;
- вологість повітря і ґрунту;
- система зрошення;
- система розсування даху тощо.

Автоматизація теплиці передбачає встановлення таких систем вимірювання й керування:

– системи клімат-контролю, що містять в собі різноманітні датчики і автоматично контролюють і керують температурою в приміщенні, вологістю та вентиляцією в теплиці, концентрацією вуглекислого газу тощо;

– системи боротьби зі шкідниками автоматично дозують кількість пестицидів, якими обприскуються рослини;

– системи управління обладнанням, завдяки яких можна переміщати ліхтарі, обладнання для посіву та збирання врожаю, тіньові навіси тощо. Такі системи автоматизують ручну працю людей під час виконання у теплиці механічних дій;

– системи керування фертигацією передбачає постачання до коренів рослин використання води, в якій розчинені добрива, через труби, прокладені в ґрунті;

– системи крапельного поливу завдяки давачам вимірюють рівень вологості ґрунту і керують водопостачанням до коренів рослин, щоб рослини отримували необхідну кількість води, але не були занадто зволожені.

Можна навести такі загальні переваги автоматизації теплиці:

– зменшення витрат на оплату праці завдяки зменшенню обсягів ручної роботи.

Це є сприятливим фактором для розширення бізнесу за рахунок звільнення низькокваліфікованих працівників та набуття нових навичок працівникам, які працюють у теплиці;

– точно знати, що відбувається у теплиці, й приймати правильні та своєчасні рішення, засновані не на припущеннях, а на фактах;

– підвищення врожайності та якості рослин за рахунок створення оптимальних умов для вирощування рослин. Саме автоматизація дасть можливість вивчити попередні цикли росту культур і вплинути на їх врожайність. Особливо важлива якість під час вирощування квітів, оскільки більш привабливі квіти мають більший попит і більш високу ціну;

– враховуючи сезонність вирощування рослин автоматизація клімат-контролю дає можливість адаптувати і коригувати розподіл параметрів залежно від стадії розвитку культури;

– у закритому середовищі теплиці, яке є ізольованим від довкілля, за рахунок автоматизації можна в значній мірі підвищити ефективність використання пестицидів для знищення бур'янів, шкідників та захворювань рослин;

– завдяки автоматизації можна дистанційно спостерігати за теплицею з будь-якого місця й в будь-який час, щоб переконатися чи не загрожує небезпека овочам або квітам й навіть теплиці в цілому. Також підключення камер спостереження та системи моніторингу параметрів мікроклімату теплиці через Wi-Fi до мережі Інтернет дає можливість відстежувати та контролювати умови для росту рослин навіть з вашого

смартфона. Давачами вимірюються параметри мікроклімату теплиці і при виявленні відхилень від заданих значень система автоматичного керування теплиці надсилає сповіщення на смартфон;

– використання новітніх технологій вирощування культур, таких як фертигація або гідропоніка, можна більш ефективно використовувати різні матеріальні та енергетичні ресурси;

– контроль параметрів мікроклімату в теплиці дає можливість ефективно планувати врожаї у майбутньому завдяки моніторингу поточних даних [3 – 5].

### **1.3 Процеси, що піддаються автоматизації й роботизації в тепличному господарстві**

Процеси автоматизації та роботизації є невід’ємними атрибутами сьогодення. Такі процеси стають більш поширеними і у тепличному господарстві. Завдяки цьому можна працювати менше, а заробляти більше. Отже, автоматизація тепличного господарства дасть можливість заощадити час і гроші. Якщо чистий прибуток від продажу врожаю, вирощеного в теплиці, поррахувати можна, то звільнений за рахунок автоматизації час можна витратити на нові дослідження, розвиток бізнесу, самовдосконалення тощо. Все що потрібно – встановити у теплиці систему автоматичного керування, робота або роботизований комплекс.

Автоматизації та роботизації піддають такі процеси:

- опалення;
- охолодження;
- освітлення;
- запилення;
- висаджування рослин;
- збирання врожаю тощо.

Опишемо більш детально такі процеси.



### *1.3.1 Автоматизація охолодження теплиці.*

Теплиці опалюють, щоб зробити комфортні умови для рослин. Зазвичай вночі довкілля за межами теплиці охолоджується, а вдень під променями сонця воно може нагріватися до високих температур. Але зниження температури повітря в теплиці, також як і збільшення, по відношенню до оптимуму для кожної культури негативно впливають на якість і кількість врожаю. Тому зазвичай вночі теплиці опалюють, а вдень – охолоджують. Процес охолодження та провітрювання теплиць може здійснюватися за рахунок відчинення та зачинення вікон, що наведено на рисунку 1.4.

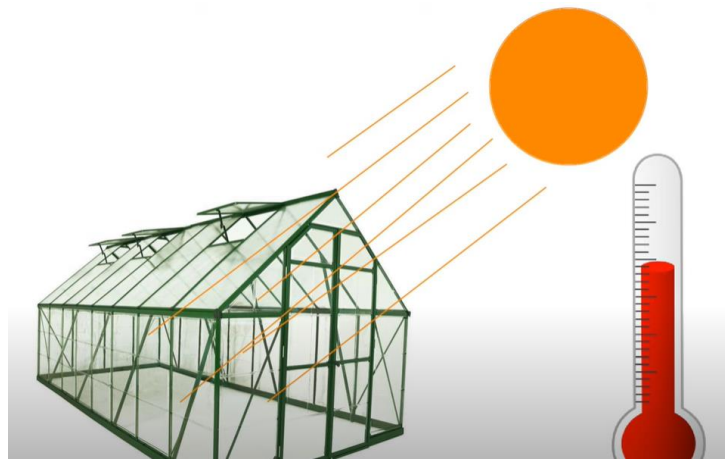


Рисунок 1.4 – Провітрювання теплиць [6]

Для підтримання температурного оптимуму та вилучення людини з цього процесу відчинення та зачинення вентиляційних отворів чи вікон використовують теплоактивовані відчинювачі вікон, наведені на рисунку 1.5.

Вони здебільшого працюють із таким типом воску, що розширюється та стискається залежно від температури повітря. У таких зачинювачах елементом налагодження температури спрацювання є гвинт. Незважаючи на таку простоту і повністю автоматизоване відчинення вікон при зміні температури спрацювання цього механізму необхідне ручне втручання людини.



Рисунок 1.5 – Теплоактивований відчинювач вікон [6]

Іншим способом охолодження є використання вентиляторів (рис. 1.6). В цьому випадку можна говорити про повністю автоматизоване охолодження повітря теплиці. В такій системі датчик температури під'єднаний до термостату, що виконує роль регулятора (рис. 1.7), а вентилятори є виконавчими механізмами системи керування. Термостат разом із датчиком температури, наведений на рисунку 1.7, коштує зазвичай до 20 доларів США, але дає можливість повністю автоматизувати керування охолодженням теплиці. Головні витрати на створення такої системи керування припадають на купівлю вентиляторів.

При досягненні заданої максимально дозвільної температури повітря, що вимірює датчик, термостат вмикає вентилятори. При зниженні температури у приміщенні теплиці термостат вимикає вентилятори. Такий процес охолодження не вимагає втручання людини і є повністю автоматизованим. Якщо треба змінити температурний режим у теплиці людина повинна виставити на термостаті інше значення температури. Це зробити дуже просто натисканням кнопок «вгору» («up») для збільшення температури вмикає вентилятори та «вниз» («down») для зменшення

температури. По завершенню налаштування натискаємо кнопку «встановити» («set»). Інформація про встановлену температуру відображається на цифровому індикаторі.



Рисунок 1.6 – Вентиляторна система охолодження теплиці [6]



Рисунок 1.7 – Давач температури та термостат [6]

Зрозуміло, що налаштування охолодження повітря теплиці за допомогою термостату та вентиляторів набагато точніше, наочніше і простіше для людини (треба лише натискати кнопки) за крутіння гвинтів кожного теплоактивованого відчинювача вікон. З іншого боку теплоактивовані відчинювачі вікон не вимагають витрат енергії, тому є енергозберігаючими.

Якщо все ж вибір зроблений у бік охолодження вентилятором, то для застосування технології енергозбереження можна використати живлення їх від сонячних панелей (рис. 1.8).



Рисунок 1.8 – Використання сонячних панелей для живлення вентилятора [6]

### ***1.3.2 Автоматизація опалення теплиці.***

Незалежно від джерел опалення для теплиці (електрика, газ, пропан, сонячна енергія, компост) головна увага повинна приділятися досяжності і вартості такого джерела енергії, а також використання ресурсозбережних технологій. За регулятор температури для такої системи можна вибрати термостат з давачем температури, наведений на рисунку 1.7. Відмінність його використання у системі опалення полягає у виконавчому механізмі, який не охолоджує повітря теплиці, а нагріває. Вигода використання термостату полягає в стабілізації зимової температури в приміщенні теплиці вночі та взимку, завдяки чому буде підтримуватися оптимальна температура

для росту культур. Існує великий вибір таких термостатів, які відрізняються за точністю регулювання, кількістю каналів, дизайном, зручністю налаштування та вартістю.

Сучасні термостати (рис. 1.9) мають функцію дистанційного передавання даних про температуру та налаштування з використанням технологій бездротових мереж Wi-Fi.



Рисунок 1.9 – Термостат з передачею даних мережею Wi-Fi [6]

Використання термостатів для регулювання температури в приміщенні теплиці є найпростішою технологією керування параметрами мікроклімату, але вона найбільше впливає на збереження ресурсів під час експлуатації зимової теплиці, оскільки найбільшими є саме витрати на її опалення.

### ***1.3.3 Автоматизація освітлення теплиці.***

Світло є головним джерелом для фотосинтезу рослин і відповідно росту та їх розвитку. Брак світла зменшує темпи росту культур та може бути причиною їх загибелі. Особливо це важливо під час вирощування взимку чи навесні в теплицях, що розташовані у північних районах. Компенсувати брак сонячного світла можна за рахунок встановлення додаткового освітлення. Існує велика кількість таких

освітлювальних систем, в яких використовують світлодіодні, люмінесцентні або деякі сучасні види освітлення.

Набагато простіше автоматизувати освітлення, ніж вмикати і вимикати його вручну за допомогою вимикача. Це можна зробити двома способами:

1) використання сонячного вимикача (рис. 1.10) із вбудованим давачем освітленості, таймером та світлодіодами. Таймер вмикає світлодіоди, якщо освітленість, виміряна давачем, менша за встановлену;



Рисунок 1.10 – Сонячний вмикач [6]

2) використання звичайного таймера або сонячного таймера без давача освітленості. Час, коли теплиця буде освітлюватися додатковими штучними джерелами світла, встановлюють вручну на декілька тижнів чи місяців. Одним з головних факторів при налаштуванні часу вмикання освітлення у теплиці є різна тривалість дня і ночі у різні місяці року та зміна куту, під яким знаходиться сонце по відношенню до теплиці протягом декількох місяців. Тому використовують сонячні таймери, в яких можна регулювати час освітлення залежно від тривалості дня і ночі (рис. 1.11).

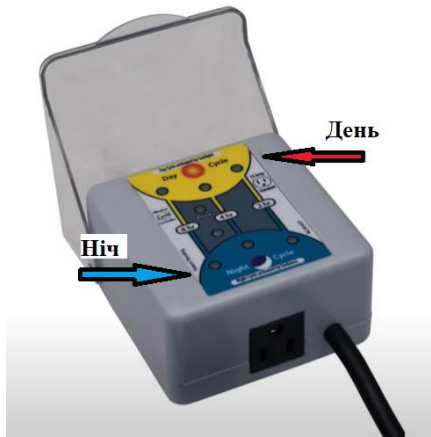


Рисунок 1.11 – Сонячний таймер освітленості [6]

Головним недоліком таймерів без датчиків освітленості є їх низька енергоефективність. Вони споживають електричну енергію навіть тоді, коли й сонячного світла могло би вистачити. Додавання датчика освітленості зменшує витрати енергій на освітлення, що впливає на підвищення ресурсозбереження теплиці.

#### ***1.3.4 Автоматизація поливу.***

Полив рослин в теплиці займає багато часу в день у садівника. Автоматизувати полив можна у декілька способів, найпростішим з яких є система поливу з регульованим таймером (рис. 1.12), який подає певну частину води в заданий час.

При такому способі потрібно чітко контролювати вологість ґрунту, для чого краще зробити систему автоматичного поливу, яка містить датчик вологості, наприклад кондуктометричний, насос та регулятор насосу. При подачі води під тиском за виконавчий механізм можна використати електромагнітний клапан або заслінку.

Для великих тепличних господарств можна придбати дорогі комерційні системи поливу (рис. 1.14) або задовольнятися більш простими системами, наприклад крапельного поливу, – це залежить від площі теплиці, зручності, ступені автоматизації

та кількості грошей, які бажаєте вкласти в систему поливу. Головне, що потрібно для таких систем є наявність води.

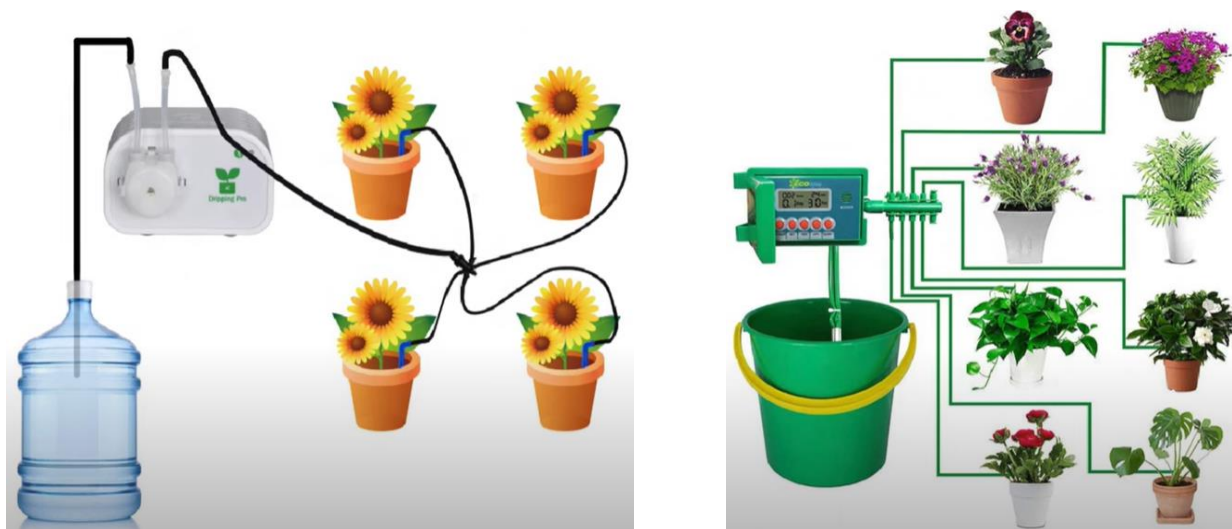


Рисунок 1.12 - Системи поливу з регульованим таймером [6]

Сучасні таймери (рис. 1.13) для поливу ґрунту є зрозумілими в експлуатації та можуть працювати від звичайних батарейок.



Рисунок 1.13 – Таймери для зволоження ґрунту [6]





Рисунок 1.14 – Комерційні системи поливу теплиць

За джерело води можна використати водопровідний кран або насос, що качає воду з водоймища або з ґрунтових вод. Якщо води з міської мережі водопостачання достатньо, то можна повністю використовувати її, але краще збирати дощову воду у бак чи цистерну. Дощова вода містить додатковий азот з повітря і мінерали та краще впливає на рослини, оскільки не містить хлору, яким обробляється вода з міської мережі.

### ***1.3.5 Автоматизація запилення рослин.***

Незважаючи на те, що деякі рослини не потребують запилення все ж запилення залишається важливим процесом для утворення плодів. Ручне запилення є достатньо ефективним, але забирає багато часу особливо це стосується великих тепличних господарств, в яких вирощують сотні, тисячі та десятки тисяч рослин. Складно й уявити скільки часу і людського резерву треба мати для того, щоб запилити декілька квіткових кожної з рослин. Також варто враховувати, що для утворення плодів квітки треба запилити у обмежені часові терміни їх квітання.

У дикій природі цей процес здійснюють комахи та бджоли. У приміщенні теплиці, особливо взимку, їх немає. Тому стандартним рішенням такої проблеми є

автоматизована система запилення за допомогою комах-роботів (рис. 1.15, а), які б виконували такі функції. Нажаль на цей час робототехніка не досягла такого розвитку, коли можна в промислових об'ємах робити рої роботів-запилювачів.



а



б

Рисунок 1.15 – Робот-бджола (а) та коробки з бджолами-листорізами (б) [6]

Поки не існує такої тварини чи гаджета, які би зрівнялися з бджолами, коли справа стосується запилення. Вони перевершують усіх птахів і комах у цій справі. Отже, в тепличному господарстві вирощування деяких рослин варто звернутися до наших «професіоналів» із запилення – до бджіл. Виникає небезпека використання бджіл через можливість бути вжаленим. Таку проблему можна вирішити, використовуючи не медоносних бджіл та джмелів, а бджіл-листорізів. Їх можна купити у спеціальних коробках (рис. 1.15, б).

Бджоли-листорізи або бджоли-муляри, як їх іноді називають, є найпростішим способом використання природних технологій для автоматизації запилення рослин у теплиці. Ще не придумано нічого кращого для збільшення врожаю, ніж інвестувати в кілька родин бджіл-листорізів. Технологія використання бджіл-листорізів, як засіб автоматизації запилення рослин, використовується у більшості великих комерційних теплиць та значною мірою впливає на збільшення виробництва продукції.

### *1.3.6 Автоматизація збору врожаю.*

Завершальним етапом вирощування рослин у теплиці є збір врожаю. Такий процес є трудомістким та вимагає наявності значних людських ресурсів, яких може не вистачати через сезонність робіт. Особливо це стосується великих комерційних теплиць. Для заощадження часу та збільшення прибутку застосовують автоматизацію збору врожаю. Але варто зазначити, що пристрої для автоматичного збору врожаю дуже відрізняються залежно від типу вирощуваних рослин. Наприклад, робот-збиральна машина для помідорів наведена на рисунку 1.16.

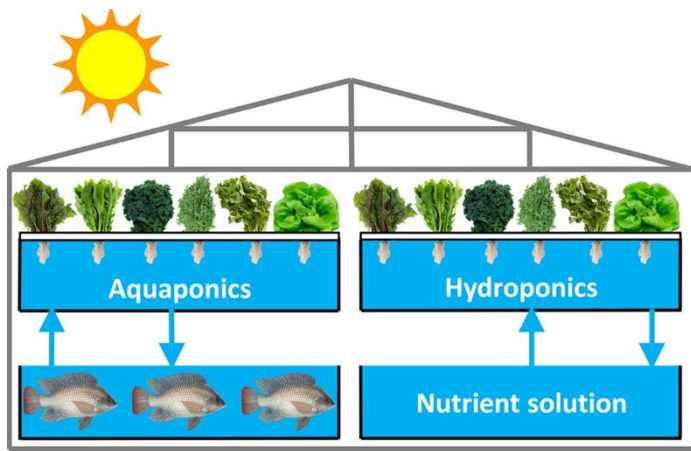


Рисунок 1.16 – Робот-збиральна машина для помідорів [6]

Для деяких рослин завдання автоматизації збору врожаю вирішується за рахунок гідропоніки та аквапоніки (рис. 1.17, а). Ці системи використовують плавучі плоти (рис. 17, б), щоб певною мірою автоматизувати збирання врожаю, переміщуючи цілі плоти в циклі, щоб коли рослини будуть готові до збору, вони були розташовані в оптимальному місці для збору врожаю.

Технологія роботизованого збору врожаю зараз лише почала розвиватися і ще не досягла значних результатів. В наш час більшість комерційних тепличних

господарств просто сезонно наймає людей для збору врожаю. Зазвичай таких робітників у своїй місцевості не вистачає, тому на період збору врожаю привозять людей з інших місцевостей і навіть з інших країн. Але не завжди вистачає достатньої кількості таких робітників і частина врожаю гине у ґрунті.



а



б

Рисунок 1.17 – Пояснення щодо технології аквапоніки й гідропоніки (а) та автоматизоване збирання врожаю в гідропонічних системах (б) [7]

Така проблема зі збором врожаю стосується й вирощування квітів, вимагаючи великої кількості ручної праці з великою кількістю опцій, доступних для автоматизації процесу збирання врожаю. Варто зазначити, що автоматизовані системи збирання врожаю можуть використовуватися не лише для тепличних господарств, а й для вирощування культур у ґрунті. Кожного року відбувається модифікація техніки та технологій збирання врожаю не лише овочів та квітів, але й фруктів. На цей час розроблені і використовуються спеціальні машини для струшування та збирання фруктів.

Незважаючи на те, що групи людей-збирачів ще існують, але ця робоча сила повільно щороку замінюється кращими, дешевшими та швидшими автоматизованими

системами та машинами-роботами для збирання врожаю. Планується, що збільшення площі теплиць у світі буде потужним стимулом для розвитку автоматизації та створення машин-роботів для збору врожаю.

#### **1.4 Система керування параметрами мікроклімату теплиці**

Існує велика кількість проєктів з реалізації системи керування теплицею. Вони відрізняються складністю та ціною обладнання, кількістю контрольованих і керованих параметрів теплиці, принципами їх регулювання. Один з прикладів реалізації системи керування теплиці наведений в роботі [8]. Така система керує трьома параметрами мікроклімату теплиці:

- температурою повітря теплиці;
- освітленістю;
- вологістю ґрунту.

За керувальний пристрій використана плата Arduino Uno. До неї підключені 4 датчики й 4 виконавчих механізмів, схема підключень яких наведена на рисунку 1.18.

Тут використані такі контури керування:

– для підтримання заданої температури повітря в теплиці за допомогою датчиків вимірюється температура ззовні (Temp Ext) та всередині (Temp Int) теплиці. Якщо температура всередині теплиці вища за задану, то завдяки серводвигуна (Servo Motor) відчиняється вікно і вмикається вентилятор (FAN). Контроль за положенням вікна здійснюється за допомогою датчика положення (Window Contact). При зниженні температури до заданого значення Arduino Uno надсилає сигнал на вентилятор та серводвигун, в результаті чого серводвигун зачиняє вікно, а вентилятор вимикається. Збільшення температури в теплиці здійснюється за рахунок вмикання лампи розжарювання (Lamp);

– для підтримання заданої вологості ґрунту використаний контур керування, що складається з датчика вологості (Humid), регулятора Arduino Uno та виконавчих механізмів у вигляді насоса (Pump) та електромагнітного клапану (Valve). При

зменшенні вологості ґрунту насос вмикається, клапан відчиняється і вода потрапляє до системи зрошення ґрунту;

– для підтримання заданого рівня освітленості використаний датчик (Lumin) та лампа (Lamp).

Оскільки такі виконавчі механізми як насос, електромагнітний клапан та лампа живляться від електричної мережі напругою 220 В, а на виході Arduino Uno +5 В, то в схемі використані твердотільні реле (Relay 1-3). Вентилятор живлять від напруги 12 В, тому у схемі використаний блок живлення (Transfo) та твердотільне реле (Relay 4). Також від блоку Transfo живлять і саму плату Arduino Uno напругою +5 В.

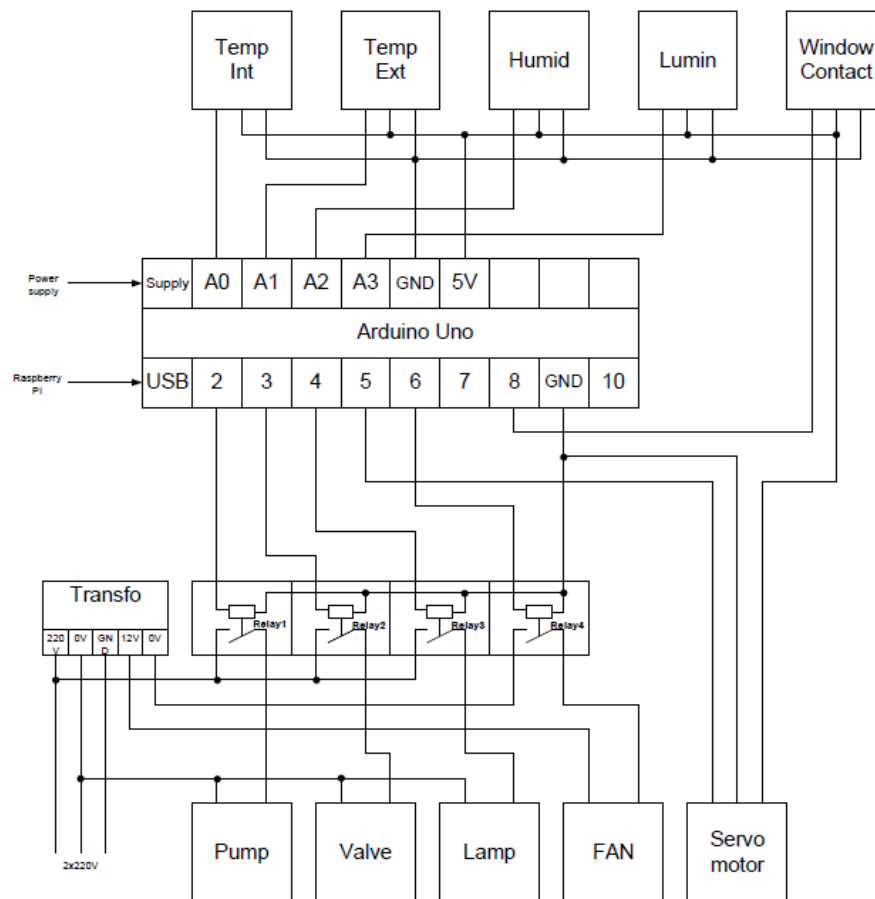


Рисунок 1.18 – Схема підключень датчиків та виконавчих механізмів до плати Arduino Uno для керування параметрами мікроклімату теплиці [8]

Для можливості дистанційного моніторингу та управління параметрами теплиці через мережу Internet автори роботи [8] пропонують до плати Arduino Uno підключити одноплатний комп'ютер Raspberry Pi 3, під'єднаний до Arduino Uno через USB-кабель. З кодом програми для плати Arduino Uno та Raspberry Pi можна ознайомитися в роботі [8].

У додаток до всього автори [8] наводять список та вартість компонентів системи керування параметрами мікроклімату. Вартість всього проекту не перевищує 5 тис. грн. (120 доларів США) і може бути зменшена майже вдвічі, якщо відмовитися від дистанційного моніторингу параметрів мікроклімату теплиці (тобто Raspberry Pi) та використання оригінальних плат Arduino, замінивши їх на клони.

Таблиця 1.1 – Список та вартість компонентів, використаних для системи керування параметрами мікроклімату теплиці [8]

Components	Whole	Features	Unit pricing (€)	Total price (€)	Reference
Arduino	1		24	24	
Raspberry Pi 3	1		40	40	
Temperature sensor	2	From -40 to 125°C	1,57	3,14	<a href="#">Lextronic</a>
Humidity sensor	1		4,97	4,97	<a href="#">Lextronic</a>
Humidity connector	1		1,5	1,5	<a href="#">Lextronic</a>
Humidity wire	1	50cm 4 pins	5,87	5,87	<a href="#">Lextronic</a>
Pump of washing machine	1	25W 220V 0,2A	0	0	Recycling
Light sensor	1	12 to 58 kohms at 10 LUX (darkness -> 1Mohms)	2,42	2,42	<a href="#">Lextronic</a>
Fan	1	16mA 12V	0	0	Recycling
Lamp	1	42W	0	0	Recycling
Servomotor	1	6V 5kg/cm	16,48	16,48	<a href="#">Lextronic</a>
Greenhouse	1	60*60*80cm		0	To make
Solenoid valve	1	220V	0	0	Recycling
Relay card	2	5V/220V / 10A / 4 relay	3,46	6,92	<a href="#">Amazon</a>
Transformer	1	220VAC/12VDC 50W 4A	6,1	6,1	<a href="#">Amazon</a>
Shipping cost	1		9,39	9,39	
Wooden frame	2	2cmx1cmx2m	3	6	<a href="#">Brico</a>
Wooden frame	2	1cmx1cmx2m	2	4	<a href="#">Brico</a>
Hinge	2		0	0	Recycling
Electric wire	1	2x2.5mm <sup>2</sup> x2m	0	0	Recycling
Electric wire	1	Alarm wire	0	0	Recycling
Socket	1		0	0	Recycling
Perforated TTH pipe	1	Dim 20mm x length 45cm	0	0	Recycling
Stroke sensor	1	Contacts NO + NC	0	0	Recycling
Connecting box	1		0	0	Recycling
Plexiglas	6	Dimensions greenhouse (sides + roofs)	0	0	Recycling
OSB plate	1	Dimensions greenhouse (floor)	0	0	Recycling
Gardena coupling	1		0	0	Recycling
<b>Total price</b>				<b>120,79 €</b>	

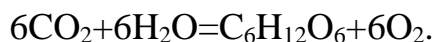
Наведений в [8] варіант створення системи керування параметрами мікроклімату теплиці є не ідеальним та дуже спрощеним. Він не може бути використаний для великих комерційних теплиць, але для примітивної автоматизації невеличких теплиць з деякими модифікаціями може бути взятим за основу. Також за допомогою такого проєкту можна відпрацювати принципи та алгоритми керування параметрами, які після – реалізувати на більш досконалії системі автоматичного керування.



## РОЗДІЛ 2 ВИХІДНІ ПОЛОЖЕННЯ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

### 2.1 Постановка завдання дослідження

Одним з параметрів мікроклімату теплиць, що не завжди враховується, є концентрація вуглецевого газу  $\text{CO}_2$  в повітрі теплиці. Вихідним положенням для дослідження питання необхідності контролю та регулювання концентрації  $\text{CO}_2$  за один з параметрів мікроклімату теплиці було пов'язано з особливостями вирощування рослин, а саме процесом фотосинтезу. Як відомо ще з біології, що в рослинах під впливом світлової енергії за участю хлорофілу утворюються органічні сполуки з вуглецевого газу та води. Хімічна формула такої реакції має вигляд:



Хлорофіли, що містяться в хлоропластах рослин, головним чином знаходяться у листях. У кожній з клітин листя знаходиться 20 – 100 хлоропластів, тобто структурних складових клітин, що перетворюють  $\text{CO}_2$  у глюкозу  $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ .

Виходячи з вище наведених фактів напрошуються висновки, що для збільшення врожайності рослин необхідно збільшувати кількість вуглецевого газу та води. Кількість світла повинна бути достатньою для процесу фотосинтезу. Враховуючи ресурсозбережну спрямованість даної роботи, важливо знайти оптимум між кількістю необхідного світла для фотосинтезу та концентрацією  $\text{CO}_2$  з урахуванням наявності хлоропластів, кількість яких залежить від площі листа рослини. Знайшовши такий оптимум треба побудувати та дослідити систему керування мікрокліматом теплиці, яка би підтримувала такий оптимум.

Отже, вихідними положеннями для побудови та дослідження ресурсозбережної системи керування мікрокліматом теплиці є керування подачею вуглецевого газу залежно від площі листа рослини та підтримання оптимуму між параметрами

освітленості та концентрацією CO<sub>2</sub>. Будемо вважати, що кількості води є достатньо для процесу фотосинтезу та розвитку рослин.

Для з'ясування доцільності контролю та регулюванню CO<sub>2</sub> варто проаналізувати вплив вуглецевого газу на процес росту рослин та визначити оптимальне значення CO<sub>2</sub> для рослин. Наступним етапом буде аналіз генераторів CO<sub>2</sub> та знаходження оптимуму між витратами вуглецевого газу та освітленістю. Завершальним кроком буде побудова і дослідження математичної й імітаційної моделей системи керування.

## **2.2 Вплив вуглецевого газу на ріст рослин**

Утворення в хлоропластах рослин цукрів з води та вуглецевого газу під впливом світла називається фотосинтезом. Під час фотосинтезу виділяється вільний кисень, який потрапляє до атмосфери Землі. Тому рослини називають «легенями» планети. В повітрі докільця вміст вуглецевого газу становить приблизно 0,004 % по відношенню до об'єму повітря атмосфери. В абсолютних одиницях – 400 частин на мільйон. У міжнародній практиці такі малі частки прийнято позначати «частка на мільйон» (англ. ppm – part per million). Тому надалі для позначення відносної концентрації вуглецевого газу будемо використати одиниці вимірювання ppm.

Незважаючи на відсутність кольору і запаху та малий вміст у атмосфері Землі вуглецевий газ є дуже важливим для підтримання життя на планеті. Рослини споживають вуглецевий газ під час фотосинтезу та виділяють його під час дихання, але споживають набагато більше газу, ніж видихають, створюючи дефіцит CO<sub>2</sub> в повітрі, що обмежує потенціальні можливості подальшого росту. Концентрація CO<sub>2</sub> в повітрі не є незмінною. Вона залежить від багатьох факторів: від пори року, часу доби, наявності рослин, водойм, промислових підприємств, транспорту, людей, тварин тощо. Але в цілому у відкритому повітрі концентрація вуглецевого газу змінюється в малих обсягах.

Інший стан притаманний для закритих приміщень. Так, вдень, коли відбуваються процеси фотосинтезу, концентрація CO<sub>2</sub> в теплиці стрімко спадає, обмежуючи процес

утворення глюкози, що сповільнює ріст рослин. Було виявлено [9] зменшення концентрації вуглецевого газу у приміщенні теплиць вдень майже у 2 рази до 150 – 200 ppm. Вночі концентрація CO<sub>2</sub> стрімко зростає через відсутність процесу фотосинтезу без світла та дихання рослин, під час якого рослини споживають кисень і виділяють вуглецевий газ. В цей час уже рослинам бракує кисню, що може також несприятливо впливати на їх життєдіяльність. Але навіть у закритому приміщенні кисню вистачає для дихання рослин вночі і залишається проблема лише з вуглецевим газом вдень під час фотосинтезу.

Збільшення концентрації CO<sub>2</sub> вдень до 800 – 1000 ppm сприятливо впливає на врожайність культур. Було проведені дослідження [9] і виявлено, що при збільшенні лише концентрації CO<sub>2</sub> вдвічі, врожайність одних рослин збільшилася на 40 – 100 % (для рослин з C<sub>3</sub>-фотосинтезом), а інших – лише на 10 – 25 % (для рослин з C<sub>4</sub>-фотосинтезом). Така відмінність впливу збільшення концентрації вуглецевого газу на ріст обумовлено різними механізмами фотосинтезу (C<sub>3</sub>-, C<sub>4</sub>-, САМ-фотосинтез).

Підтвердженням значного збільшення маси рослин з C<sub>3</sub>-фотосинтезом при збільшенні концентрації CO<sub>2</sub> є результати досліджень [10] (рис. 2.1) для рослин з різним типом фотосинтезу.

Не вдаючись в деталі механізмів фотосинтезу варто зазначити, що майже 95 % всіх рослин світу здійснюють C<sub>3</sub>-фотосинтез [10, 12]. Лише такі чотири сільськогосподарські культури як кукурудза, просо, сорго та цукрова тростина мають C<sub>4</sub>-фотосинтез. Для інших сільськогосподарських рослин збільшення концентрації CO<sub>2</sub> суттєво вплине на їх розвиток.

Подальше збільшення концентрації вуглецевого газу спочатку призводить до збільшення врожайності, але після деякого оптимуму шкідливо впливає на їх розвиток. Залежність швидкості росту від концентрації CO<sub>2</sub> наведена на рисунку 2.2. Варто зазначити, що така залежність є усередненою, але для більшості рослин найбільше зростання врожайності відбувається при концентраціях вуглецевого газу у повітрі в межах від 800 ppm до 1400 ppm. Автори [10] вважають що навіть

концентрація у 1500 ppm, яка була під час крейдяного періоду Землі є корисною для рослин. Подальше підвищення концентрації CO<sub>2</sub> негативно впливає на розвиток рослин і при досягненні значення 1800 ppm є токсичним для них.

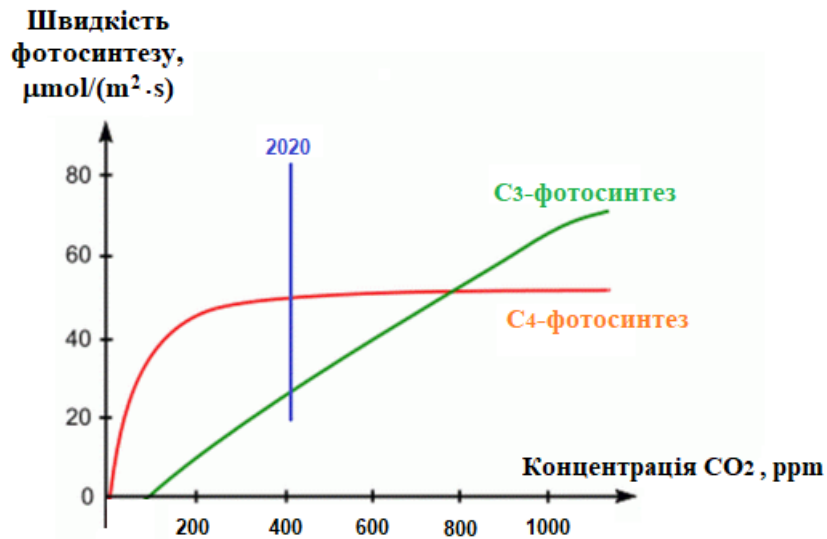


Рисунок 2.1 – Залежність швидкості фотосинтезу від концентрації вуглецевого газу для рослин з C<sub>3</sub>- та C<sub>4</sub>-фотосинтезом [11]

Для експериментального підтвердження наведених вище тверджень проведемо аналіз декількох досліджень з впливу концентрації CO<sub>2</sub> на ріст різних культур.

Ще на початку минулого століття ставили експерименти, в яких було виявлено збільшення врожайності деяких культур при збільшенні концентрації вуглецевого газу в повітрі [10]. В 1920 році роботи були опубліковані результати експериментів в Німеччині, що підтверджували значне збільшення врожайності картоплі при збільшенні концентрації CO<sub>2</sub>. Тоді вуглецевий газ навіть назвали «дорогоцінним повітряним добривом». Протягом останнього століття експерименти з вуглецевим газом не припинялися. В експериментах досліджували розвиток різних культур при підвищеній концентрації CO<sub>2</sub>. Результати одного з таких експериментів [10] наведені на рисунку 2.3.

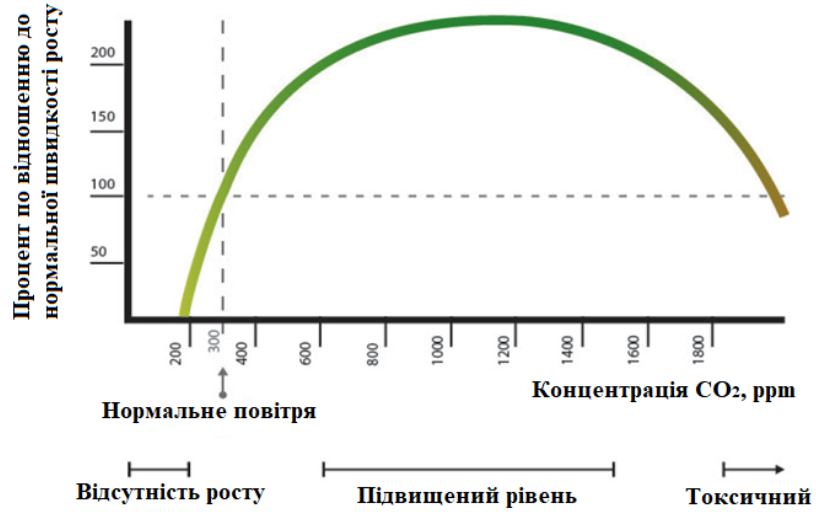


Рисунок 2.2 – Залежність швидкості росту рослин від концентрації вуглецевого газу в повітрі [9]



Рисунок 2.3 – Експериментальне підтвердження доктора Шервуда Ідсо про вплив підвищеної концентрації вуглецевого газу на ріст сосон [10]

На рисунку 2.3 доктор Шервуд Ідсо на прикладі сосон показує на скільки збільшився їх розмір залежно від концентрації CO<sub>2</sub>. Для порівняння він взяв сосну, яка росла без додавання вуглецевого газу і сосни, що вирощувалися з його додаванням через кожні 150 ppm. Як видно з результатів дослідження доктора Ідсо збільшення концентрації CO<sub>2</sub> майже вдвічі (+300 ppm) спричинило дворазове збільшення висоти сосни (тобто, майже на 100 %). Але цей ефект продовжує впливати і на подальше збільшення висоти дерева у випадку концентрації у 835 ppm.

Підтвердженням таких досліджень є стаття [13], в якій досліджувався вплив вуглецевого газу на коріння і на надземні частини рослини (рис. 2.4). З графіку видно, що суха вага коріння мало змінюється при зміні CO<sub>2</sub> в повітрі, в той час як суха вага надземної частини рослини показала стрімке зростання, яке поширилося до концентрації вуглецевого газу у 1200 ppm. Оскільки суха маса коріння набагато менша за масу стебла та листя рослини, то стрімке зростання останніх в більшій ступені відбивається на збільшенні сухої маси всієї рослини.

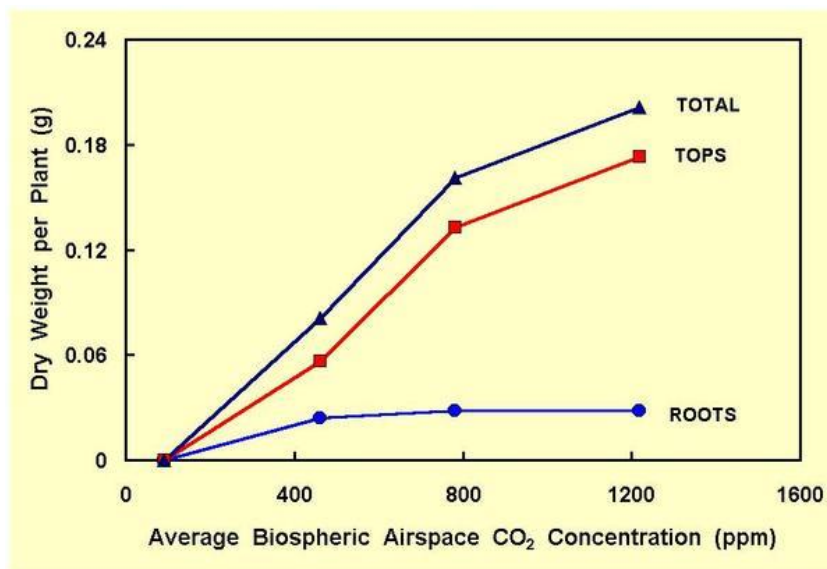


Рисунок 2.4 – Графіки залежності сухої кореневої (roots), надземної (tops) та загальної (total) маси рослин від концентрації CO<sub>2</sub> [13]

Навпаки, зменшення концентрації CO<sub>2</sub> спричиняє пригніченню розвитку рослин, а при концентрації у 92 ppm повну їх загибель.

Наведений вище аналіз робіт показав доцільність підвищення концентрації вуглецевого газу у приміщенні теплиці у 2 – 3 рази до рівня 800 – 1400 ppm.

Експеримент, який визначив напрямок моїх досліджень, наведений в роботі [14]. Автори [14] для експерименту взяли однакові рослини і висіяли їх у скляні банки з однаковою кількістю ґрунту. Розташували такі банки на підвіконні. Одна банка була герметично закрита без додавання CO<sub>2</sub>. Будемо вважати, концентрація останнього найімовірніше відповідала 350 – 400 ppm. Другу скляну банку закрили і додали надлишковий вуглецевий газ. Нажаль у роботі не наводять концентрацію цього газу. Кожні декілька днів протягом трьох тижнів вимірювали висоту рослин.

В ході експерименту автор виявив кращий розвиток рослин у скляній банці без додаткового вмісту вуглецевого газу порівняно із його надлишком. Автор зробив висновок, що надлишок CO<sub>2</sub> здійснює негативний вплив на розвиток рослини, хоча й спочатку сподівався на протилежний результат.

На мою думку поясненням результатів експерименту [14] є, по-перше, не відоме значення концентрації вуглецевого газу у другій банці. Не виключено, що там концентрація могла перевищувати 1800 ppm і, отже, бути отрутною для розвитку рослин. Іншим фактором, є той факт, що для фотосинтезу потрібно ще й світло. Тому додавання CO<sub>2</sub> без збільшення освітленості ніяк не вплине на процеси фотосинтезу. Більш того, молекули вуглецевого газу гірше пропускають сонячне світло, відбиваючи його, що є гальмівним фактором для процесу фотосинтезу.

Отже, з дослідів цієї роботи можна зробити висновок, що позитивний результат у збільшенні врожайності за рахунок збільшення концентрації вуглецевого газу в зачиненому об'ємі (у нашому випадку у приміщенні теплиці) може бути досягнутий лише при пропорційному збільшенні освітленості поверхні листів рослин і достатньої для фотосинтезу кількості води. При чому, для ресурсозбережного керування

концентрацією CO<sub>2</sub> й освітленістю рослин треба підтримувати їх оптимум, щоб світла вистачало саме для фотосинтезу, а не було надлишковим.

Сучасні системи контролю параметрів мікроклімату теплиці та довкілля, збалансування подачі поживних речовин, системи освітлення з використанням різних типів джерел світла, відновлювані джерела енергії тощо досягли високого рівня досконалості. Незважаючи на популярність використання промислових тепличних господарств, що обумовлено застосуванням їх автоматизації та новітніх технологій, деякі системи, які суттєво впливають на врожайність тепличних культур, ще знаходяться на початкових стадіях розвитку. Єдиним фактором, що обмежує досягнення отримання максимального росту рослин є кількість вуглецевого газу у повітрі теплиці, необхідного для фотосинтезу. Отже, додавання CO<sub>2</sub> дає потенційні можливості збільшення врожайності сільськогосподарських культур, що вирощують у тепличних господарствах, але при цьому треба враховувати переваги і недоліки збільшення концентрації вуглецевого газу.

Переваги від додавання CO<sub>2</sub> [9]:

- збільшення врожайності та швидкості росту рослин за рахунок збільшення процесу фотосинтезу;
- рослини дозрівають швидше, що дає можливість заощадити на теплоенергоносіях, а також на витратах на оплату роботи людей у теплиці. У деяких випадках зменшення тривалості вирощування може бути використано для повторного вирощування цієї культури у теплиці;
- додавання CO<sub>2</sub> змінює якість продукції, особливо це стосується квітів – збільшуються їх розміри і кількість, що суттєво впливає на їх вартість;
- використовуючи певні генератори CO<sub>2</sub>, що працюють за рахунок спалювання, наприклад, природного газу, відбувається не лише насичення повітря вуглецевим газом, а й її обігрів та зменшуються викиди парникових газів у атмосферу;



– зменшується випаровування води рослинами та більш ефективно вона використовується саме для збільшення зеленої маси рослин за рахунок участі її у процесі фотосинтезу.

Недоліками від додавання CO<sub>2</sub> є такі [9]:

– потрібні додаткові витрати на купівлю, впровадження та обслуговування системи генерування та контролю вуглецевого газу;

– деякі генератори CO<sub>2</sub> можуть виділяти такі шкідливі для рослин і людей гази як чадний газ, етилен, оксид азоту, діоксид сірки тощо, які утворюються при неповному згоранні, що може призвести до загибелі рослин, забруднення довкілля та отруєння людини, яка працює у теплиці. Для запобігання цьому треба встановлювати додаткові системи контролю шкідливих речовин;

– отримати максимальний врожай за рахунок лише збільшення концентрації CO<sub>2</sub> не можливо, якщо не оптимізувати й інші параметри, наприклад температуру, освітленість та вологість. Є експериментальні роботи [14], в яких виявлено негативний вплив додавання вуглецевого газу на ріст рослин у теплиці без збільшення освітленості;

– різні росли на різних стадіях росту в різній мірі реагують на додавання CO<sub>2</sub>. Рослини, що здійснюють C<sub>4</sub>-фотосинтез, мало чутливі до збільшення концентрації вуглецевого газу у повітрі, тому ефект від його додавання може бути несуттєвим або взагалі відсутнім;

– насичення теплиці вуглецевим газом обмежує можливість провітрювань теплиць, оскільки це зменшить концентрацію CO<sub>2</sub> в приміщенні та призведе до забруднення атмосфери парниковими газами;

– у теплиці складно підтримувати певну концентрацію вуглецевого газу через провітрювання та його нерівномірну витрату рослинами в процесі фотосинтезу вдень та видихання вночі;

– неконтрольоване та надмірне насичення повітря теплиці CO<sub>2</sub> (більше 1800 ppm, див. рис. 2.2) може пригнічувати ріст рослин та призвести до їх загибелі. Також його концентрація більша за 5000 ppm є отруйною й для людини.

У доповнення до цього також варто зазначити, що концентрацію, тривалість і час додавання вуглецевого газу треба вибирати залежно від багатьох факторів. Якщо швидкість росту парникової культури задовольняє виробника, то витратити гроші на впровадження системи генерування та контролю вуглецевого газу не має сенсу. Також потрібно аналізувати витрати на таку систему і прибуток з продажу додаткового врожаю. Можливо доцільно використовувати систему збагачення CO<sub>2</sub> лише взимку та весною або під час певної стадії росту рослини, у всі інші періоди її можна вимкнути для зменшення витрат. Оскільки фотосинтез рослин збільшується після сходу сонця, досягає максимуму опівдні й стрімко зменшується під час його заходу, то в теплиці варто систему генерації вуглецевого газу вмикати вдень під час процесу фотосинтезу, закриваючи вентиляційні отвори, а вночі (коли рослини видихають CO<sub>2</sub>) навпаки вимикати генератор CO<sub>2</sub> і здійснювати вентиляцію теплиці. Збільшувати тривалість фотосинтезу, і навіть зробити його цілодобовим, можна за рахунок використання штучного освітлення, особливо для вирощування овочів та листової зелені в гідропонних теплицях. В такому випадку система насичення повітря теплиці вуглецевим газом є обов'язковою, оскільки останній витрачається протягом доби без відновлення.

Логічним буде дослідження способів генерування CO<sub>2</sub> та генераторів для утворення вуглецевого газу.

### **2.3 Способи отримання вуглецевого газу [9]**

Вуглецевий газ є одним з газів, присутніх в атмосфері Землі. Його концентрація є змінною, але в середньому складає 350 – 400 ppm. Для утворення вуглецевого газу в штучних умовах існує декілька способів, наведених нижче, але варто врахувати, що в багатьох із них одночасно й утворюються супутні гази такі як чадний газ, етилен, озон,

оксид азоту, діоксид сірки тощо, які шкодять розвитку рослин та можуть призвести до їх загибелі. Наприклад, лише 50 ppm є згубним для рослин. Тому при насиченні повітря теплиць потрібно обов'язково контролювати наявність та концентрацію перерахованих вище газів.

Розглянемо методи та принцип генерування CO<sub>2</sub>.

### **Природний вуглецевий газ.**

Оскільки вуглецевий газ є вільним і важчим за повітря, він стелиться над поверхнею ґрунту теплиці. Природний вуглецевий газ, що видихають рослини вночі, за допомогою вентилятора можна підняти вгору до листів рослин. Але при цьому його концентрація не на багато буде перевищувати концентрацію CO<sub>2</sub> в докільлі. Використання вентиляторів є найпростішим способом збільшення концентрації CO<sub>2</sub> саме біля фітопластів, найбільша кількість яких знаходиться у листях рослин. Іншим природним способом утворення CO<sub>2</sub> є видихання його людьми та тваринами. Люди, які знаходяться у теплиці також видихають вуглецевий газ, який потрібний рослинам для фотосинтезу.

Такий метод збагачення повітря CO<sub>2</sub> є непридатним для автоматизованих теплиць, оскільки він дає можливість незначно збільшувати концентрацію вуглецевого газу, а автоматизація зменшує кількість персоналу, що працює у теплиці до мінімуму.

### **Резервуари зі стиснутим вуглецевим газом**

Одним з найбільш популярним методом збільшення концентрації CO<sub>2</sub> у теплиці є використання резервуарів зі стисненим газом. В таких резервуарах вуглецевий газ знаходиться у стисненому рідкому стані. За допомогою випарника його випаровують (переводять в газоподібний стан), після чого через отвори полівінілхлоридних (ПВХ) труб рівномірно розподіляють по всій площі теплиці.

Незважаючи на всю простоту цього методу він має ряд недоліків. По-перше, такий метод можна використовувати лише для невеликих теплиць, оскільки

резервуари мають не великий об'єм (рис. 2.5), недостатній для тривалого насичення повітря великої теплиці вуглецевим газом.



Рисунок 2.5 – Резервуар для зберігання стисненого рідкого вуглецевого газу

По-друге, для відновлення кількості газу в резервуарі потрібно завозити його за допомогою вантажівок, що робить такий метод дорогим. Для оцінки кошторису використання такого методу можна навести результати [10]. Згідно з їх даними для підтримання концентрації вуглецевого газу від 1200 ppm до 1500 ppm протягом двох тижнів в теплиці розміром 20 м<sup>2</sup> (5×4 м<sup>2</sup>) витрачається газу CO<sub>2</sub> на суму від 800 грн. до 2000 грн.

Третім недоліком є велика ціна обладнання для зберігання вуглецевого газу під тиском. Наприклад, резервуар об'ємом 10 м<sup>3</sup>, наведений на рисунку 2.5, коштує 119 тис. грн. Треба також врахувати й додаткове обладнання таке як витратоміри, давачі та регулятори тиску, електромагнітні клапани, давачі CO<sub>2</sub> тощо.

Отже, такий метод є дорогим і може бути корисним у випадку вирощування цінних дорогих культур таких як медичний канабіс (в Європейському Союзі вирощування медичного канабісу дозволено, в Україні – заборонено законодавством), женьшень тощо. Також більш ефективно та екологічно заповнювати такі резервуари викидами  $\text{CO}_2$ , що створюють промислові підприємства. В такому випадку резервуари використовують для накопичування вуглецевого газу та постачання в теплиці в заданих об'ємах. Це дає можливість не лише збільшити площі теплиць, але й зробити постачання  $\text{CO}_2$  безкоштовним. Більш того можна отримати додатковий прибуток від зменшення забруднення довкілля. Такий метод збагачення повітря теплиці  $\text{CO}_2$  доцільно використовувати або для невеликих теплиць, або у сукупності з промисловими підприємствами.

### **Генератори вуглецевого газу**

Продуктами спалювання природного газу або пропану є вуглецевий газ. Таке явище використовують в генераторах  $\text{CO}_2$ . При згоранні природного газу окрім вуглецевого газу також утворюється тепло, яке можна витратити на обігрів теплиці. Як показано в роботі [9] для насичення повітря теплиці вуглецевим газом до концентрації 1500 ppm генератором  $\text{CO}_2$ , наведеним на рисунку 2.6, витрати за рік становлять приблизно 120 грн. на 1 м<sup>2</sup> рослин. Такий генератор коштує від 40 тис. грн. до 100 тис. грн. Один такий генератор може забезпечити концентрацію  $\text{CO}_2$  до 1500 ppm теплицю площею до 442 м<sup>2</sup> [15]. Недоліком таких генераторів є можливість утворення чадного газу, шкідливого як для рослин так і для людей, під час його неповного згорання при недостатній кількості кисню. Це вимагає додаткових витрат на встановлення додаткової системи контролю шкідливих домішок і газів. Також для використання такого генератора необхідне постійне постачання спалюваного газу, тобто потрібні додаткові витрати для підведення до теплиці мережі природного газу або пропану, якщо така теплиця не газифікована. Інша проблема пов'язана з необхідністю вимкнення горілки при досягненні заданої концентрації  $\text{CO}_2$  та

наступним ввімкненням її через можливість виходу з ладу системи запалювання, що є вибухонебезпечним.

Враховуючи вартість такого генератора (але ж він дешевший за резервуар для зберігання  $\text{CO}_2$ ) та потужності, цей метод краще використовувати для великих промислових теплиць, щоб зменшити витрати на одиницю вирощеної продукції.



Рисунок 2.6 – Генератор  $\text{CO}_2$  для комерційної теплиці, що може працювати як на пропані так і на природному газі [9, 10, 15]

Якщо теплиця має невеликі розміри, то можна використати менші генератори  $\text{CO}_2$ , які являють собою звичайні горілки. У випадку відсутності підключення до газової мережі у невеликих теплицях можна використати балони з природним газом або пропаном (рис. 2.7). Витрати на купівлю балонів з вуглецевим газом для підтримання концентрації  $\text{CO}_2$  в межах від 800 ppm до 1200 ppm у теплиці площею до

50 м<sup>2</sup> становлять від 250 грн. до 350 грн. на місяць. Враховуючи, що період росту більшості рослин становить 3 – 4 місяці, то витрати на балони з вуглецевим газом на увесь період вирощування культури знаходиться в межах 1 тис. грн.

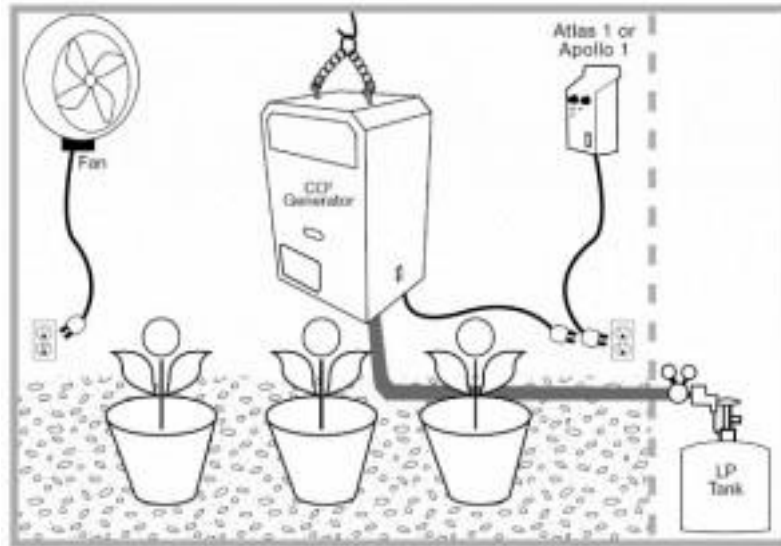


Рисунок 2.7 – Використання генераторів CO<sub>2</sub> для невеликих теплиць [16]

На рисунку 2.7 введені такі позначення:

CO<sub>2</sub> Generator – генератор вуглецевого газу;

LP Tank – балон з пропаном, при використанні природного газу балон позначається NG Tank;

Fan – вентилятор;

Atlas 1 or Apollo 1 – давач концентрації вуглецевого газу.

### Газові двигуни для отримання CO<sub>2</sub>

Альтернативним методом для генерування вуглецевого газу для великих комерційних тепличних господарств є використання газових двигунів. В такій системі (рис. 2.8) газовий двигун виробляє не лише тепло для опалення теплиць та вуглецевий

газ для процесу фотосинтезу рослин, але ще й електричну енергію для освітлення та інших потреб тепличного господарства.

Газовий двигун (gas engine) за своїм принципом роботи схожий на двигун внутрішнього згоряння, але за паливо використовує газ. Спалений газ нагріває двигун та обертає його вал. Охолодження двигуна відбувається за рахунок рідини, яка через теплообмінник передає своє тепло воді системи опалення теплиці (показано червоним на рис. 2.8). Подальше нагрівання води відбувається від нагрітого вихлопного газу у теплообміннику (heat exchanger). Нагріта вода акумулюється у теплозбірнику (heat accumulator) та використовується для обігріву теплиці, після чого процес нагрівання води повторюється.

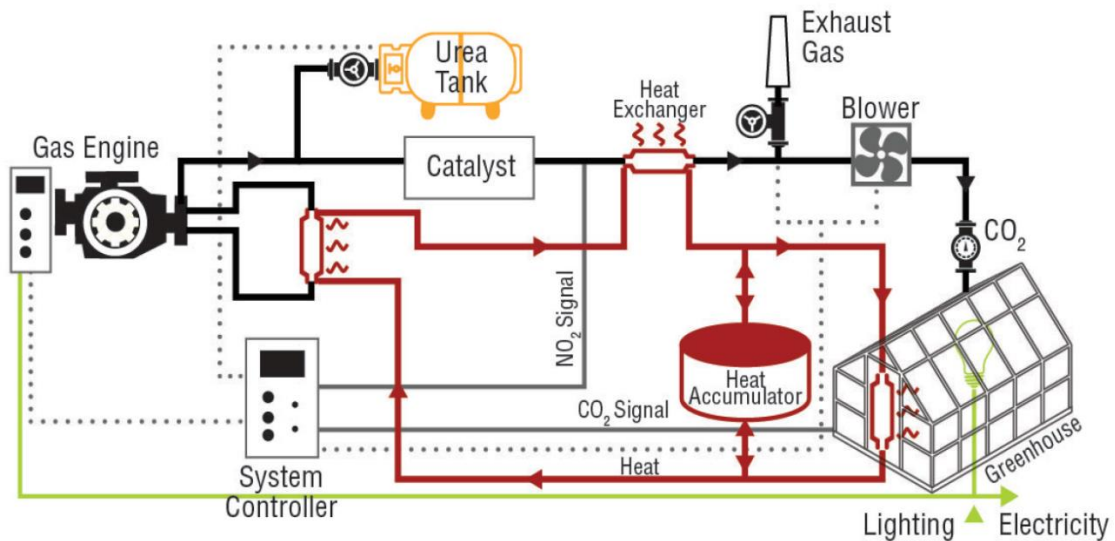


Рисунок 2.8 – Використання газового двигуна для обігріву, освітлення та збагачення повітря теплиці вуглецевим газом [9]

Вихлопні гази (показано чорним на рис. 2.8), окрім  $\text{CO}_2$ , можуть містити й інші шкідливі для рослин домішки. Тому для очищення вуглецевого газу використовують каталітичний нейтралізатор (catalyst). Після нейтралізатора встановлені датчики



шкідливих газів, сигнали з яких ( $\text{NO}_2$  signal) потрапляє на контролер (system controller). Щоб не допустити потрапляння шкідливих газів до теплиці відпрацьований газ із шкідливими домішками (exhaust gas) через додаткові фільтри викидається у довкілля.

Також вихлопні гази мають високу температуру. Якщо подати такий газ у теплицю, то він викличе опік рослин та їх загибель. Тому у теплообміннику (heat exchanger) відбувається охолодження вуглецевого газу до температури до  $55\text{ }^\circ\text{C}$ .

Якщо концентрація  $\text{CO}_2$  нижча за задану, то вмикається повітродувка (blower) і вуглецевий газ спрямовується у теплицю. За додаткове джерело вуглецевого газу також використовується резервуар для сечовини (urea tank).

Вироблена двигуном електрична енергія потрапляє для освітлення теплиці (показано зеленим на рис. 2.8) та використовується й для інших потреб.

Роботою всієї системи керує системний контролер (system controller).

Незважаючи на високу вартість такої системи, що може досягати 3 млн. грн., одного такого двигуна є достатньо для забезпечення теплом, електрикою та вуглецевим газом тепличного господарства площею до 4 га, тобто 75 грн. на кожний  $1\text{ м}^2$ , що можна окупити за один врожай.

### **Розкладання і бродіння**

Окрім людини та тварин вуглецевий газ виділяють й різні бактерії та мікроби. Вони у процесі своєї життєдіяльності споживають органічні речовини, якими можуть бути як різні органічні відходи так і залишки рослин. Це можна використати не лише для утворення вуглецевого газу, необхідного для фотосинтезу рослин, але й для утилізації залишок рослин та утворення компосту, який містить багато споживних речовин та можна використати за органічні добрива. Все що потрібно для такого процесу – органічні відходи, бактерії та ємність, куди можна все покласти (рис. 2.9). Для регулювання концентрації  $\text{CO}_2$  використаний насос.

Витрати на реалізацію розкладання є мінімальними, оскільки завжди при вирощуванні рослин залишаються органічні відходи; процес розкладання органічних залишків здійснюють у пластикових контейнерах, вартість яких також мала.



Рисунок 2.9 – Обладнання для утворення вуглецевого газу за допомогою процесу розкладання органічних відходів [9]

Незважаючи на переваги (утилізація, компост,  $\text{CO}_2$ ) такого методу він має деякі обмеження. По-перше, для отримання достатньої концентрації вуглецевого газу потрібно багато субстрату та місця, що зменшить площі культур у теплиці. По-друге, складно контролювати та керувати кількістю  $\text{CO}_2$ , оскільки утворення останнього мікроорганізмами відбувається повільно. По-третє, об'ємів  $\text{CO}_2$  може бути достатнім для невеликих теплиць та кімнатних садів. По-четверте, побічно до вуглецевого газу мікроорганізми виділяють інші гази, які зазвичай мають неприємний запах. Останній недолік (неприємний запах) на цей час вирішений за рахунок використання особливих бактерій та герметизації контейнерів для бродіння.

Окрім бактерій, для отримання вуглецевого газу використовують і дріжджі. В цьому випадку у герметичний пластиковий контейнер завантажують цукор, воду й дріжджі. Останні в результаті процесу бродіння виділяють не лише CO<sub>2</sub>, але й етанол, який під час спалення виділяє тепло і перетворюється у вуглецевий газ.

Перевагами методу бродіння порівняно з розкладанням є більша швидкість отримання вуглецевого газу та утворення етанолу, який є органічним паливом. Недоліками окрім необхідності великого простору для процесу бродіння, неприємного запаху та складнощів у контролі та регулюванні концентрації CO<sub>2</sub> є ще додаткові витрати на цукор та дріжджі.

Загальними недоліками методів утворення вуглецевого газу за рахунок розкладання та бродіння є обмеженість їх використання для великих комерційних тепличних господарств та складність їх автоматизації.

### **Сухий лід**

Сухий лід являє собою твердий стан вуглецевого газу, в який він переходить при температурі у  $-73$  °C. Сухий лід коштує не багато. При нагріванні він переходить у газоподібний стан, насичуючі повітря CO<sub>2</sub>. Під час нагрівання він поглинає тепло, охолоджуючи повітря. Отже, такий спосіб доцільно використовувати лише влітку для додаткового охолодження теплиці. Також сухий лід краще використовувати для невеликих теплиць площею до 10 м<sup>2</sup>.

Перевагами цього методу є низька вартість сухого льоду, мінімальні витрати на обладнання та можливість регулювання випаровування CO<sub>2</sub> за рахунок зміни температури нагрівання. Витративши на купівлю сухого льоду до 100 грн. можна отримати й підтримувати концентрацію вуглецевого газу 1300 ppm у повітрі теплиці площею 10 м<sup>2</sup> протягом доби. Для підтримання постійної концентрації CO<sub>2</sub> сухий лід поділяють на невеличкі шматочки, яких вистачає до двох годин, через цей термін додають інші. Важливо під час сублімації сухого льоду контролювати концентрацію вуглецевого газу, оскільки вона може досягти значень у 2000 ppm і вище, що буде токсичним для рослин та вб'є їх. Також є труднощі із зберіганням сухого льоду,

оскільки треба мати камери, в яких підтримується температура нижча за  $-78\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Необережне доторкання до сухого льоду, що знаходиться при такій температурі, також може нашкодити людині.

### **Хімічний метод**

Як відомо з курсу хімії, що під час деяких хімічних реакцій можуть виділятися гази, в тому числі й вуглецевий газ. Найяскравішою реакцією виділення  $\text{CO}_2$ , що часто використовують в харчовій промисловості, є хімічна реакція при додаванні кислоти (наприклад, оцтової) до харчової соди. Такий спосіб отримання вуглецевого газу можна автоматизувати за рахунок дозування подачі кислоти у харчову соду. Але для хімічного методу потрібні великі об'єми обох реагентів, що робить метод дорогим. Також для насичення усієї теплиці достатньою кількістю вуглецевого газу необхідно багато часу. Тому хімічний метод доцільно використовувати у малих об'ємах, наприклад для проведення експериментів, коли витрати на обладнання для інших методів насичення повітря  $\text{CO}_2$  є великими.

В результаті аналізу методів отримання  $\text{CO}_2$  найефективнішим методом був визнаний метод спалювання природного газу в генераторі вуглецевого газу (рис. 2.6), якщо не використовуються промислові викиди  $\text{CO}_2$ . Інші методи мають малу продуктивність або великі витрати на обладнання як під час використання газових двигунів.

## **2.4 Зв'язок концентрації вуглецевого газу з іншими параметрами мікроклімату теплиці**

Якісно проаналізуємо вплив на ріст тепличних культур додавання  $\text{CO}_2$  у сукупності з такими параметри як освітленість, волога, температура та поживні речовини.

### **Вуглецевий газ та освітленість**

Як було розглянуто раніше ріст рослин відбувається за рахунок процесу фотосинтезу, в якому беруть участь вуглецевий газ, вода і світло. Швидкість

фотосинтезу залежить від кількості  $\text{CO}_2$  у повітрі. Але каталізатором для фотосинтезу є світло. Якщо освітленість поверхні листя є недостатньою, то менша кількість вуглецевого газу буде використовуватися в процесі фотосинтезу, швидкість якого буде зменшуватись. Збільшення кількості світла збільшить швидкість фотосинтезу до певної межі. Таку межу називають точкою насичення світла. Це означає, що світла достатньо, щоб увесь вуглецевий газ брав участь у процесі фотосинтезу. Подальше збільшення освітленості ніяк не відіб'ється на процесі фотосинтезу. Тобто, додаткові витрати на освітлення будуть зайвими. Досягнення точки насичення світла відповідає ресурсозбережному керуванню та сприяє збільшенню швидкості росту та кількості врожаю.

*При збільшенні концентрації вуглецевого газу для досягнення точки насичення світла необхідно пропорційно збільшувати освітленість, що, в свою чергу, прискорить процес фотосинтезу рослин. Таке прискорення фотосинтезу дасть можливість збільшити врожайність та зменшити термін вирощування тепличних культур.*

### **Вуглецевий газ та волога**

Що стосується води, яка бере участь у процесі фотосинтезу, при підвищенні концентрації  $\text{CO}_2$  витрати води збільшуються, але додатковий вуглецевий газ у повітрі впливає на зменшення витрат води під час дихання рослин. Підвищення концентрації вуглецевого газу сприяє закриттю устиць, через які рослини видихають  $\text{CO}_2$  і випаровують вологу. Завдяки зниженню випаровування води рослини більш ефективно витрачають воду на процес фотосинтезу і вимагають менших її витрат на полив та зрошення. Більш того, закриття продихових клітин, зменшення випаровування води та збільшення швидкості фотосинтезу сприяють кращому зростанню рослин в умовах нестачі вологи. Отже, додавання вуглецевого газу зменшує витрати води рослинами і дає можливість зберігати воду, особливо в умовах її дефіциту, що є фактором ресурсозбереження.

## Вуглецевий газ і температура

Температура довікля впливає на фізичні, хімічні та біологічні процеси, в тому числі й на процеси фотосинтезу. При збільшенні температури процеси фотосинтезу прискорюються, сприяючи росту рослин. Враховуючи, що температура лише впливає на швидкість споживання рослиною вуглецевого газу, то при збільшенні концентрації  $\text{CO}_2$  треба збільшувати швидкість процесу фотосинтезу за рахунок підвищення температури.

На рисунку 2.10 наведені графіки залежності фотосинтезу від температури повітря без додавання вуглецевого газу (чорна лінія) та з підвищеним вмістом  $\text{CO}_2$  (синя лінія).

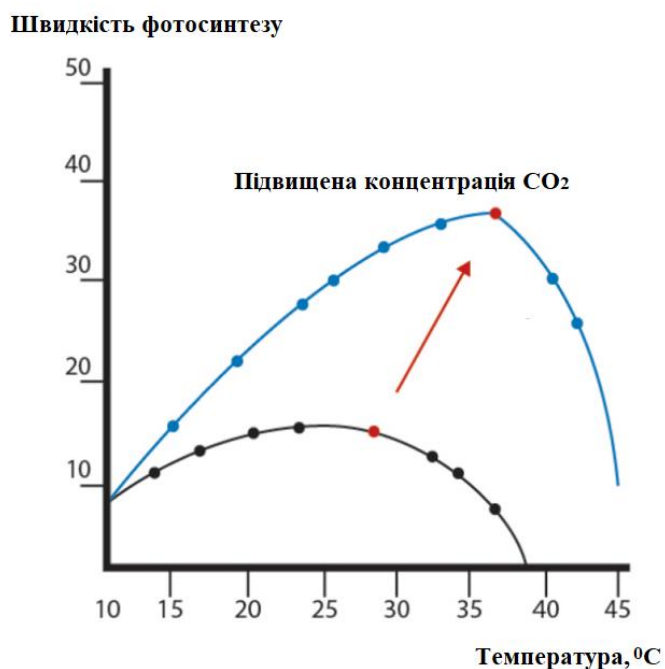


Рисунок 2.10 – Залежності швидкості фотосинтезу від температури без додавання (чорна лінія) і з додаванням (синя лінія) вуглецевого газу [9]

Порівнюючи ці два графіки можна зробити висновок, що при збільшеній концентрації  $\text{CO}_2$  швидкість фотосинтезу стрімко зростає. Також з графіків видно, що для досягнення максимальної швидкості фотосинтезу при додаванні вуглецевого газу

треба також збільшувати температуру листя рослини. Подальше збільшення температури призведе до погіршення процесу фотосинтезу та зменшення його швидкості, але навіть не оптимальне значення температури при підвищеній концентрації  $\text{CO}_2$  показує вищу швидкість фотосинтезу, ніж без додавання вуглецевого газу.

### **Вуглецевий газ і поживні речовини**

Логічним є, що збільшення швидкості фотосинтезу при додаванні вуглецевого газу спричиняє посилений ріст коренів та листя рослин. Це, в свою чергу, збільшує споживання корінням рослин поживних речовин, що містяться у ґрунті. Тому зазвичай у тепличних господарствах при збільшенні концентрації вуглецевого газу у повітрі також збільшують кількість органічних і мінеральних добрив. Враховуючи, що кожний вид рослин не однаково споживає різні мінеральні елементи і сполуки, на цей час не розроблено точних рекомендацій щодо оптимального співвідношення між додаванням  $\text{CO}_2$  та поживними речовинами. Загальними рекомендаціями є одночасне збільшення концентрації добрив при додаванні вуглецевого газу. З іншого боку є дослідження, в яких виявлено зменшення вмісту деяких елементів в рослинах, що росли при підвищеній концентрації  $\text{CO}_2$ . Це може свідчити про зменшення потреб рослин у деяких елементів при додаванні вуглецевого газу.

Стосовно співвідношення концентрації  $\text{CO}_2$  та поживних речовин питання є недостатньо вивченим і вимагає подальших досліджень.

## **РОЗДІЛ 3 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПАРАМЕТРАМИ МІКРОКЛІМАТУ ТЕПЛИЧНОГО ГОСПОДАРСТВА**

### **3.1 Обґрунтування математичної моделі тепличного господарства**

На перший погляд теплиця являє просту систему, що складається з приміщення, в якому ростуть рослини. При глибокому дослідженні тепличного господарства можна виявити багато фізичних і біологічних процесів, які є взаємопов'язаними і впливають один на інший. Щоб зрозуміти та керувати процесами в теплиці потрібно їх дослідити. Треба вивчити процеси росту рослин, їх реакції на зовнішні впливи, динаміку процесів у теплиці, характеристики та методи керування ростом рослин та мікрокліматом теплиці тощо.

Отже, тепличне господарство можна навести за систему, що складається з декількох підсистем, що взаємодіють між собою. На рисунку 3.1, створеному на основі аналізу робіт [17, 18], показане таке наведення.

Для дослідження складних систем у системному аналізі [19] використовують прийом декомпозиції, який полягає в розбитті складної системи на більш прості підсистеми із встановленням зв'язку між ними. Пропонується навести тепличну систему у вигляді таких підсистем:

- підсистема, що враховує параметри довкілля, пов'язані з погодними й кліматичними умовами та може бути описана за допомогою погодної моделі довкілля з такими параметрами як температура та вологість повітря, сонячне випромінення, швидкість вітру, концентрація вуглецевого газу тощо;

- підсистема мікроклімату в теплиці, що описує кліматичні параметри всередині теплиці, найпоширенішими з яких є температури повітря, ґрунту, рослин, вологість повітря та ґрунту в теплиці, концентрація вуглецевого газу, освітленість рослин, концентрація споживних речовин тощо. Для дослідження цієї підсистеми використовують *мікрокліматичну модель*;



- підсистема, в якій вивчається вплив біологічних процесів, що відбуваються в тепличній рослині, до яких відносяться процеси фотосинтезу, транспірації (випаровування вологи), дихання тощо на масу та розміри рослин. Така підсистема описується *моделлю росту* або *моделлю врожаю*. Ефективність росту можна оцінити за параметрами врожаю такими як площа листа, суха маса листа, суха маса коріння, загальна суха маса, структурна суха маса, неструктурна суха маса;
- підсистема, що використовується для визначення балансу між економічними витратами на вирощування рослини та прибутком від продажу врожаю;
- підсистема обладнання та складових керування параметрами мікроклімату, що описується моделлю системи керування мікрокліматом теплиці. У такій математичній моделі обладнання та елементи керування наводять у вигляді математичних виразів з подальшим моделюванням процесу керування.

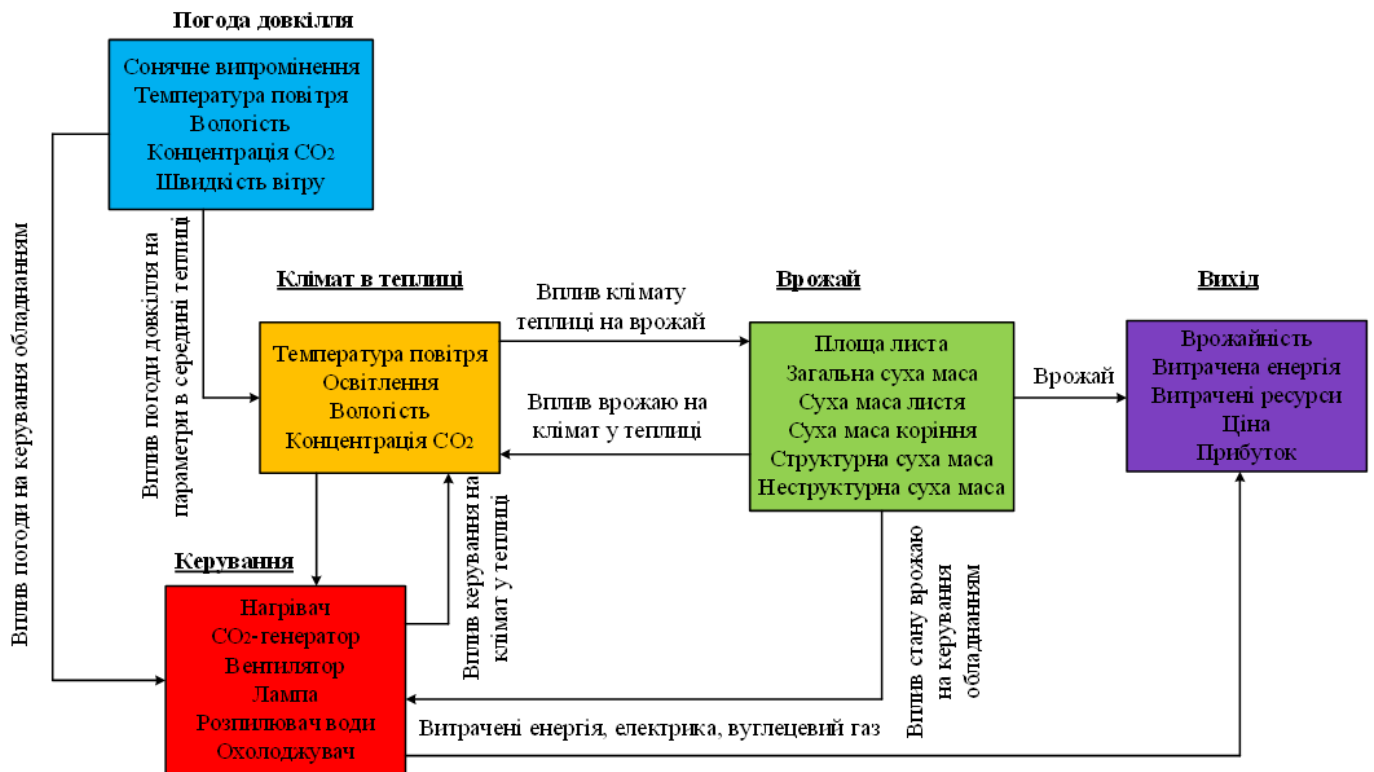


Рисунок 3.1 – Структурна схема тепличної системи

Наведені підсистеми є взаємозв'язаними та впливають одна на іншу, що на рис. 3.1 показано лініями та стрілками. Так, погодні умови ззовні теплиці будуть впливати на параметри мікроклімату всередині теплиці, в результаті чого система керування буде регулювати роботу обладнання. Наприклад, під час ясної сонячної погоди освітлення теплиці може бути вимкнено, під час збільшення або зменшення температури доквілля може вмикатися вентиляція або опалення. Безпосередній зв'язок існує для моделей мікроклімату в теплиці та моделлю росту (врожаю): залежно від виду рослини та стадії її росту треба підтримувати певні параметри мікроклімату всередині теплиці, в свою чергу, швидкість біологічних процесів та врожайність рослин (їх маса) буде залежати від мікрокліматичних умов та від таких заходів як обрізка листя, збір врожаю, опилення, оброблення рослин інсектицидами та пестицидами, додавання регуляторів росту, що не залежать від системи керування, але впливають на стан культури. Для підтримання заданих параметрів мікроклімату в теплиці, витрачаються матеріальні та енергетичні ресурси, які коштують певні гроші. Оскільки економічні показники визначаються відповідно до затрат на вирощування та прибутку від продажу врожаю, то на рисунку 3.1 показаний зв'язок між моделлю врожаю, моделлю керування та економічною моделлю.

Найбільш доцільно для досліджень використати математичне моделювання динамічних процесів, що відбуваються у теплиці. Оскільки на ріст рослин впливають параметри мікроклімату в теплиці, розглянемо систему рослина – мікроклімат і дослідимо як параметри впливають на рослини. Треба враховувати, що не лише розвиток рослин залежить від мікроклімату теплиці, але й самі рослини змінюють мікроклімат. Тому така система є взаємозв'язаною з безперервним обміном енергією та речовиною.

Так зміна таких фізичних параметрів як температура, вологість, концентрація газів (наприклад, вуглецевого), освітленість, кількість і склад добрива впливають на біологічні процеси, що відбуваються в рослинах. З іншого боку деякі біологічні

процеси такі, як процес фотосинтезу, випаровування вологи, дихання рослин спричиняють зміну параметрів мікроклімату. Для отримання максимального врожаю треба керувати параметрами мікроклімату теплиці. Це ускладнює модель, додаючи до неї підсистему «система керування параметрами мікроклімату». Завдання аналізу тепличного мікроклімату також ускладнюється з одного боку наявністю граничних умов, з іншого – різними вимогами та рішеннями в реалізації системи керування.

Виходячи з вищесказаного моделювання краще поділити на два види:

– *математичне моделювання – для описання впливу параметрів мікроклімату теплиці на біологічні процеси, що протікають в рослині;*

– *імітаційне моделювання – для дослідження якості системи керування параметрами.*

Отже, завдяки математичному моделюванню можна визначити не лише параметри мікроклімату, що найкращим чином впливають на ріст рослин, але й оптимальні співвідношення між такими параметрами, підтримання яких буде задачею системи керування.

Згідно з [18] можна вибрати один з чотирьох підходів до оптимізації керування:

– максимальна продуктивність тепличного господарства, яка характеризується масою та розмірами рослин а також їх якістю. Під час такого підходу головна увага спрямована на максимальну врожайність тепличних культур без врахування витрат та ціни на продукцію;

– максимальне співвідношення між зібраним у теплиці врожаєм та вкладеними в теплицю грошима, тобто тут ціна продукції на ринку не розглядається, але витрати на створення тепличного господарства та вирощування врожаю враховуються;

– максимальна економічна вигода. Такій підхід хоча і враховує витрати на вирощування культур, але повністю орієнтований на ринковий попит та ціну на продукцію. Врожайність або якість товару не є головним показником, оскільки збільшення пропозиції на ринку може вплинути на зменшення ціни одиниці товару, а, отже, й на прибуток;

– мінімальні матеріальні та енергетичні витрати на одиницю врожаю. В цьому випадку отримання максимального врожаю і ціна на продукцію не є показниками реалізації такого критерію, хоча не на пряму критерій врожайності присутній. *Мінімальні матеріальні та енергетичні витрати є принципами ресурсо- та енергозбережного керування, чому й присвячена ця робота.*

Погодна модель довкілля та економічна модель виходять за межі досліджень цієї роботи.

При математичному моделюванні починати треба з дослідження властивостей об'єкта керування, яким є система «параметри мікроклімату – ріст рослин» [20].

### **3.2 Аналіз математичних моделей тепличних господарств**

До 1980-х років математичне моделювання теплиць розвивалося мляво. Це пов'язано з багатьма факторами:

- непопулярністю використання тепличних господарств, оскільки населенню вистачало врожаю, вирощеного на полі;
- низьким розвитком мікропроцесорної техніки, що робило системи керування для теплиць ненадійними, громіздкими й дорогими;
- відсутністю системного вивчення процесів росту рослин;
- відсутністю сучасних технологій та матеріалів для побудови самої теплиці та систем керування тощо.

Зі збільшенням кількості населення в світі й розвитком науки і техніки теплиці почали все частіше використовувати для вирощування культур в несприятливих для них умовах. Це збільшило як комерційну, так і наукову зацікавленість до організації тепличних господарств. Комерційна складова тепличних господарств вплинула на розширення теплиць, пошуку нових матеріалів, втілення нових технологій, нового обладнання, нових наукових досліджень. Тому кількість математичних моделей з 1980-х років почала стрімко зростати. Також відбувалося постійне вдосконалення математичних моделей теплиць, виявлення нових зв'язків, закономірностей, методів

моделювання тощо. З'явилися різні моделі, що описували теплиці з різних аспектів: за цілями, за точністю, за складністю, за прозорістю. Недостатня прозорість математичних моделей сприяла створенню нових моделей. В погоні за точністю та всебічністю моделі ставали все складнішими, втрачаючи розуміння ключових процесів. Тому серед такого різноманіття без систематизації моделей складно вибрати математичну модель, що відповідає певним вимогам. При неправильному початковому виборі моделі неможливо отримати адекватні результати.

В роботі [17] наведений аналітичний огляд математичних моделей тепличних господарств, що були опубліковані за період 2018 – 2020 років. Автор проаналізував близько 180 робіт, які стосуються математичного моделювання теплиць. Був узятий широкий спектр дослідницьких робіт, що відрізнялися такими факторами:

– цілі досліджень (системний аналіз різних чинників, керування параметрами тепличного клімату, пошукове моделювання, моделювання дизайну теплиці та її елементів, калібрування моделі). Під час системного аналізу досліджувалися питання використання сонячної енергії для тепличного господарства, впливу теплиці на довкілля, опалення теплиць тощо. Під час керування параметрами мікроклімату теплиці розглядалися питання вибору різних методів керування таких як оптимальне керування, адаптивне керування, нечітка логіка, нейронні мережі, ПД-регулювання. Пошукове моделювання пов'язане з оцінкою потреб на опалення, порівнянням стратегій керування, заощадженням енергії на освітлення тощо. Під час моделювання дизайну теплиці здійснювалося проєктування енергоефективного покриття, форми, розташування теплиці та окремих її елементів таких як жалюзі, теплові екрани, розташування сонячних панелей на даху. Калібрування моделі враховує диференційну еволюцію параметрів та прогнозування змін мікроклімату теплиці, глибокі мережі тощо;

– типи теплиць (тунельні, аркові, поліетиленові, скляні, китайські сонячні, промислові теплиці «Venlo»);

– типи обладнання, що використовуються у теплицях (котел, система опалення та охолодження, накопичувачі тепла, вентилятори, тепловий та затемнюваний екрани, генератор CO<sub>2</sub> та система розподілення вуглецевого газу, система подавання води, зволоження зрошення та туманоутворення, різні типи ламп для освітлення теплиці, сонячні батареї та джерела енергії тощо.

У більшості робіт були запропоновані нові математичні моделі тепличних господарств, трохи менше робіт розширяли та доповнювали вже існуючі моделі, деякі роботи присвячені модифікації опублікованих математичних моделей при використанні нових досліджень, матеріалів, технологій. Існує цілий ряд робіт, в яких метою є розроблення самої моделі або використання певної методології математичного моделювання.

Якщо в попередні роки моделювання було більше спрямоване на такі рослини як огірки, салат, квіти, то за період публікацій 2018 – 2020 тенденція змінилася у бік томатів. Більше третини усіх випадків математичних моделей за цей період стосується саме цієї культури.

Стосовно математичних моделей тепличних господарств, то вони мають спільну структуру, але відрізняються різними компонентами та їх залежностями. Переважна більша частина моделей являють собою поєднання раніше оприлюднених елементів математичних моделей, а лише невелика кількість містить в собі нові компоненти.

У більшості моделей були такі відмінності при врахуванні таких компонент:

– сонячне випромінення, яке враховується в моделі або приймається за частку від загального теплового навантаження;

– опалення, яке розраховується як вхідна змінна або як частка обігріву теплиці по відношенню до інших джерел тепла (наприклад, під час використання генератора CO<sub>2</sub> або газового двигуна, описаних у попередньому розділі). В багатьох роботах враховувалося, що теплове випромінення ламп освітлення пропорційно споживної потужності останніх, хоча в реальності така залежність виконується не для всіх типів ламп, наприклад, під час використання світлодіодних ламп теплове випромінення на

стільки мале, що ним можна знехтувати при розрахунку теплового балансу. Також у багатьох роботах не враховувалося приховане тепло (наприклад, під час конденсації пари на холодних стінках теплиці) та втрата тепла під час контакту стін і даху теплиці з довкіллям. В деяких моделях не враховані втрати тепла під час вентиляції або припускаються незалежними від температури довкілля;

– процеси фотосинтезу та транспірації (випаровування вологи рослинами) описані лише в третій частині всіх проаналізованих математичних моделей. Навіть в тих моделях, що їх враховували, автори в пізній мірі розраховували такі процеси;

– економічні складові тепличного господарства такі як врожайність, прибуток, ціна тощо досліджувалася лише в небагатьох моделях. Також більшість авторів припускали, що врожайність рослини прямопропорційна чистому фотосинтезу і мало залежить від інших процесів;

– динаміка впливу тепличного мікроклімату на ріст рослин. В багатьох роботах вважалося, що зміна параметрів мікроклімату одночасно вплине на біологічні процеси, що відбуваються в рослині. В дійсності динаміка розвитку рослини набагато повільніша, ніж динаміка зміни параметрів мікроклімату в теплиці;

– експериментальна перевірка адекватності моделі здійснювалася менше, ніж для половини математичних моделей, але оскільки стандартної методики перевірки математичної моделі теплиці не існує, то кожний дослідник робив власну вибірку кількості рослин, частоти вибірки вимірювань (від однієї секунди до одного місяця) та тривалості експерименту, яка знаходилася в межах від однієї доби до одного року. Деякі дослідники за результатами експериментів будували графіки та порівнювали з результатами, отриманими під час моделювання, а інші - використовували деякі параметри для підтвердження адекватності запропонованої математичної моделі. Відсутність стандартної методики оцінки якості математичної моделі на даному етапі розвитку не дає можливості об'єктивно визначити є модель адекватною або вона є надлишковою і занадто складною.

Причинами створення нових математичних моделей тепличних господарств є такі:

– збільшення різноманіття сільськогосподарських культур, що вирощують у теплицях, спричиняє до необхідності розроблення нових математичних моделей, оскільки біологічні процеси в рослинах мають власні особливості та в різній мірі реагують на зовнішні параметри та способи їх оброблення. Деякі дослідники розробляють математичні моделі тепличного господарства для загальної культури;

– використання нового обладнання мотивує розширення математичної моделі та інколи спричиняє створення нових моделей;

– ускладнення моделі через намагання точніше описати всі компоненти моделі або спрощення, щоб уникнути надлишковості та знехтувати несуттєвими найменш впливовими її компонентами. Недолік складних моделей полягає в складності їх розуміння та виявлення закономірностей. З більш простих моделей можна легше отримати інформацію, навіть якщо в цьому випадку результати будуть менш точними. Варто зазначити, що спрощення моделі не завжди призводить до погіршення її точності та адекватності, а в деяких випадках дають більш точні прогнози в моделях врожаю. Виходячи з вищесказаного треба намагатися спростити математичну модель, але в процесі її спрощення враховувати як це вплине на точність отриманих за допомогою моделі результатів. Як запропоновано в роботі [17] *для виявлення можливості спрощення моделі треба провести оціночні розрахунки кожного процесу ускладненої моделі окремо і визначити, який внесок він має у результати всієї моделі, щоб при спрощенні моделі за рахунок його вилучення оцінити значення похибки. Така операція дасть можливість виявити як домінуючі фактори та і несуттєві;*

– величезне різноманіття типів теплиць, що відрізняються формою (тунельна, арочна, багатогранна, односхила або пристінна, двосхила, краплеподібна, голландська), розмірами, сезонністю (літня, зимова), призначенням (для квітів, для овочів, для розсади), матеріалом корпусу, матеріалом покриття (полікарбонат, скло,



поліетилен, агроволокно), кліматичними умовами, технологіями вирощування (гідропонні, аеропонні, аквапонні, ґрунтові) тощо.

– недостатня прозорість та неповність опису існуючих математичних моделей, що не дає можливості їх використання для певних тепличних господарств. Також посилення на закриті або вже видалені ресурси обмежує застосування розроблених моделей і підштовхує дослідників до створення власних моделей замість з'ясування та доповнення існуючих моделей.

### **3.3 Математична модель системи «параметри мікроклімату – ріст рослини»**

#### ***3.3.1 Вимоги до математичної моделі***

Початковими умовами вибору математичної моделі тепличного господарства були такі:

– метою математичного моделювання є визначення оптимальних співвідношень між параметрами мікроклімату для мінімізації матеріальних та енергетичних витрат на вирощування одиниці врожаю;

– виходячи з мети математичного моделювання будемо розглядати сукупність моделей мікроклімату та росту рослини;

– математична модель повинна являти собою динамічний баланси енергії, вуглецевого газу, водяної пари;

– за параметри мікроклімату вибрані температура повітря в теплиці, концентрація вуглецевого газу, освітленість, вологість повітря;

– в моделі мікроклімату будемо враховувати деякі параметри клімату довкілля;

– в моделі росту повинні враховуватися біологічні процеси в рослині та вплив параметрів мікроклімату на їх швидкість;

– для мінімізації біологічних процесів, що розглядаються в математичній моделі росту, виберемо рослину, що не утворює квіток і не вимагає опилення. В роботі моделювання росту рослини здійснювалося для салату. Із біологічних процесів, що

впливають на врожайність, враховували процеси фотосинтезу, транспірації (випаровування вологи) та дихання;

– врожайність рослини будемо оцінювати за сухою масою рослини;

– моделі, що описують економічні показники та елементи систем керування, не є метою наведеного математичного моделювання;

– для виявлення домінуючих факторів математичну модель доцільно за можливістю спростити, для чого потрібно провести оціночні розрахунки кожного процесу ускладненої моделі окремо і визначити, який внесок він має у результати всієї моделі;

– враховуючи критичні наукові публікації стосовно нових математичних моделей теплиць, за основу виберемо модель, що має експериментальну перевірку на адекватність, і спростимо її. У першому наближенні за найпростішу модель, що враховує більшість з поставлених вимог, візьмемо математичну модель Ван Хентена [17] та порівняємо її з більш складними моделями.

### ***3.3.2 Модель енергетичного балансу***

Існують різні за складністю моделі, що відрізняються кількістю описаних об'єктів, процесів, вхідних даних та впливових змінних. Наприклад, в моделі енергетичного балансу Ван Хентена (Van Henten) [21] (3.1) враховані лише два об'єкта (повітря всередині теплиці і повітря ззовні) та всього три процеси (сонячна енергія, опалення та вентиляція). В моделі Де Цварта (De Zwart) – 17 об'єктів, такі як повітря, ґрунт, підлога, рослина, небо, тепловий екран тощо. Більш детально з моделлю Де Цварта можна ознайомитися в роботі [17].

$$dT/dt = (Q_{\text{сонце}} + Q_{\text{опалення}} - Q_{\text{вентиляція}}) / c_{\text{сар,Q}}, \quad [^{\circ}\text{C}/\text{c}] \quad (3.1)$$

де  $dE/dt$  – це зміна теплової енергії в теплиці за одиницю часу;

$c_{\text{сар,Q}}$  – теплоємність повітря в теплиці,  $[\text{Дж} \times \text{м}^{-2} \times ^{\circ}\text{C}^{-1}]$ ;

$Q_{\text{сонце}}$  – теплова складова сонячного випромінення,  $[\text{Вт} \times \text{м}^{-2}]$ ;

$Q_{\text{опалення}}$  – теплова енергія, передана теплиці системою опалення,  $[\text{Вт} \times \text{м}^{-2}]$ ;

$Q_{\text{вентиляція}}$  – обмін тепловою енергією між повітрям теплиці та довкіллям зовні теплиці за рахунок вентиляції,  $[\text{Вт} \times \text{м}^{-2}]$ .

В моделі для опису енергетичного балансу, що запропонована авторами [17, 20], були зроблені такі припущення, що теплова енергія всередину теплиці надходить від таких джерел:

– сонячної енергії  $Q_{\text{сонце}}$ ;

– системи опалення теплиці  $Q_{\text{опалення}}$ ;

– ламп розжарювання  $Q_{\text{лампа}}$ .

Теплова енергія в теплиці витрачається на такі процеси:

– повітрообмін через вентиляцію  $Q_{\text{вентиляція}}$ ;

– витрати на приховане тепло  $Q_{\text{прихований}}$ , яке витрачається під час процесів випаровування;

– витрати тепла на кондуктивний і конвективний обмін тепла зовні теплиці  $Q_{\text{кон}}$ ;

– витрати теплової енергії на теплове випромінювання  $Q_{\text{ІЧ}}$ , оскільки будь-яке нагріте тіло випромінює тепло у вигляді інфрачервоного випромінення;

– тепло  $Q_{\text{охолодження}}$ , що відбирається механізмами системи охолодження при їх використанні.

Рівняння теплового балансу можна навести у вигляді (3.2):

$$dE/dt = Q_{\text{сонце}} + Q_{\text{опалення}} + Q_{\text{лампа}} - Q_{\text{вентиляція}} - Q_{\text{прихований}} - Q_{\text{кон}} - Q_{\text{ІЧ}} - Q_{\text{охолодження}}. \quad [\text{Вт} \times \text{м}^{-2}] \quad (3.2)$$

Кожний процес моделі можна описати виходячи з фізичних законів. Так теплову енергію Сонця  $Q_{\text{сонце}}$  можна навести у такому вигляді:

$$Q_{\text{сонце}} = \alpha_{\text{сонце}} \times I_{\text{сонце}}, \quad [\text{Вт} \times \text{м}^{-2}] \quad (3.3)$$

де  $\alpha_{\text{сонце}}$  – частка сонячного випромінення, що перетворюється у тепло теплиці. В деяких моделях коефіцієнт  $\alpha_{\text{сонце}}$  вважається сталим і не залежить від положення Сонця на небосхилі, в інших моделях – залежить від розташування Сонця на небі. Також цей коефіцієнт може суттєво залежати від перепускної здатності матеріалу даху теплиці для інфрачервоного діапазону.

Інша частка сонячного випромінення надходить у вигляді світла та бере участь в процесі фотосинтезу; процесами відбиття, розсіювання випромінення з поверхні теплиці та поглинання тепловими екранами в даній моделі не враховуються;

$I_{\text{сонце}}$ , [Вт×м<sup>-2</sup>] – інтенсивність випромінення Сонця, яку можна виміряти за допомогою давача освітленості.

Схожим виразом можна описати теплову енергію, що створює лампа розжарювання  $Q_{\text{лампа}}$ :

$$Q_{\text{лампа}} = \alpha_{\text{лампа}} \times I_{\text{лампа}}, \text{ [Вт} \times \text{м}^{-2}] \quad (3.4)$$

де  $\alpha_{\text{лампа}}$  – частка випромінення лампи, що сприяє обігріву повітря теплиці. Коефіцієнт  $\alpha_{\text{лампи}}$  перш за все залежить від типу лампи (лампи розжарювання, газорозрядні, люмінесцентні або світлодіодні лампи) і у випадку використання світлодіодних ламп або при відсутності штучного освітлення їм можна знехтувати;

$I_{\text{лампа}}$ , [Вт×м<sup>-2</sup>] – потужність, що споживає лампа від джерела електрики.

В моделі пропонується використовувати світлодіодні лампи, що мають невеликий коефіцієнт теплового випромінення лампи  $\alpha_{\text{лампа}}$ , яким для спрощення моделі можна знехтувати. Будемо вважати, що вся потужність, спожита світлодіодними лампами перетворюється у фотосинтетично активне випромінення.

Втрати тепла під час вентиляції можна оцінити за формулою, що описує рух повітря крізь вентиляційний отвір:

$$Q_{\text{вентиляція}} = v \times C_p \times (T_1 - T_2), [\text{Вт} \times \text{м}^2] \quad (3.5)$$

де  $v$  – швидкість повітрообміну [м/с];

$C_p$  – питома теплоємність повітря, яка дорівнює приблизно  $1185 \text{ Дж} \times \text{м}^{-3} \times \text{°C}^{-1}$  при густині повітря  $\rho = 1,23 \text{ кг/м}^3$ ;

$T_1 - T_2$  – різниця температур всередині та ззовні теплиці, [°C].

В різних моделях по-різному враховують втрати теплової енергії через вентиляційні отвори. В найпростіших моделях такими втратами нехтують або вважають постійними при незмінній швидкості повітрообміну  $v$ . Це є обґрунтованим для зимових теплиць, коли треба зберігати тепло всередині теплиці, щоб морозне повітря не потрапило на рослини, та для теплиць весною та восени, коли температура всередині  $T_1$  і ззовні  $T_2$  приміщення майже однакові (див. (3.5)). У більш складних моделях розглядається декілька повітрообмінів, як наприклад в моделі Де Цварта. Взагалі швидкість повітрообміну  $v$  залежить від багатьох факторів таких як розташування вікон, їх геометрії, розмірів, ступені відкриття, кількості, швидкості вітру ззовні теплиці, різниці температур ( $T_1 - T_2$ ) тощо.

Тому залежно від мети моделювання, точності моделі та властивостей теплиці процес вентиляції може бути описаний рівняннями різної складності. Оскільки для України кліматичні умови та ґрунт дає можливість вирощувати овочі та квіти влітку у полі, то математична модель теплиці буде стосуватися зимового періоду, коли провітрювання не буде використовуватися (тобто,  $Q_{\text{вентиляція}} = 0$ ), або при сталій швидкості повітрообміну ( $v = \text{const}$ ) у весінній та осінній період року.

Процес конвекції (перенос тепла потоками речовини), який є одним з видів теплообміну, так само як і явище теплопровідності, можна описати за допомогою закону Фур'є:

$$Q_{\text{кон}} = \lambda \times (T_1 - T_2), [\text{Вт} \times \text{м}^2] \quad (3.6)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнтом теплообміну,  $[\text{Вт} \times \text{м}^{-2} \times ^\circ\text{C}^{-1}]$ ;

$T_1 - T_2$  – різниця температур двох тіл,  $[\text{°C}]$ .

Варто зазначити, що у випадку конвекції коефіцієнт теплообміну  $\lambda$  найчастіше описується нелінійною функцією і може змінювати своє значення залежно від швидкості руху теплоносія.

Кондуктивний обмін теплом відбувається за рахунок процесу теплопровідності, який також можна описати виразом (3.6) з тією відмінністю, що для такого випадку  $\lambda$  буде коефіцієнтом теплопровідності. У більш простих моделях враховується втрата тепла на стінках та даху теплиці. Тоді коефіцієнтом теплопровідності  $\lambda$  визначається матеріалом покрівлі, а різниця температур  $T_1 - T_2$  відповідає температурі повітря всередині ( $T_1$ ) та ззовні ( $T_2$ ) теплиці. У більш складних моделях теплообмін у теплиці може описуватися між тепличним повітрям і матеріалом покрівлі, між трубами опалення та повітрям у теплиці, між тепличним повітрям і ґрунтом, між різними шарами ґрунту, між повітрям і рослинами, між поверхнею лампам розжарювання та повітрям теплиці тощо. Незважаючи на відмінність наведених об'єктів теплообміну, всі вони описуються схожим виразом (3.6) і відрізняються лише коефіцієнтами теплопровідності  $\lambda_i$  та об'єктами, між якими визначається різниця температур  $T_1 - T_2$ .

З фізики відомо, що будь-яке нагріте тіло при температурі, що перевищує абсолютний нуль ( $T > 0 \text{ K}$ ), випромінює інфрачервоні хвилі, енергія яких визначається за формулою Стефана – Больцмана:

$$F = \sigma \times T^4, \quad (3.7)$$

де  $F$  – потужність теплового випромінювання з одиниці площі;

$\sigma$  – стала Стефана – Больцмана, що дорівнює  $5,67 \times 10^{-8} [\text{Вт} \times \text{м}^{-2} \times \text{K}^{-4}]$ .

Але всі нагріті тіла навіть при мінусовій температурі Цельсія випромінюють теплові хвилі. Важливим для моделі є різниця зміна теплової енергії, що

випромінюється тілами всередині та ззовні теплиці. Тоді втрату теплової енергії за рахунок інфрачервоного випромінення можна визначити з формули:

$$Q_{\text{тц}} = \varepsilon_1 \times \varepsilon_2 \times \sigma \times ((T_1)^4 - (T_2)^4), \text{ [Вт} \times \text{м}^{-2}] \quad (3.8)$$

де  $\varepsilon_1$  та  $\varepsilon_2$  – коефіцієнти випромінення кожного з тіл, які залежать від властивостей матеріалів;

$T_1$  та  $T_2$  – температура тіл у градусах Кельвіна.

Оскільки теплове випромінення повітря незначне, а головним чином його випромінюють тверді елементи, то такими тілами у моделі теплиці є поверхня теплиці та хмари або небо взагалі. Теплову енергію, яке випромінює небо, можна узяти за деяку функцію від температури ззовні теплиці, а температуру покриття теплиці можна дорівняти до температури всередині теплиці.

Аналогічно можна промодельювати втрати потужності на теплове випромінення для рослин, ґрунту, обладнання теплиці.

Витрати теплової енергії на приховане тепло  $Q_{\text{прихований}}$  пов'язані з переходами речовини в інший агрегатний стан. В теплиці такі переходи відбуваються по відношенню до води, що випарується.

Теплова енергія, що витрачається на процес випаровування води, може бути розрахована, виходячи з виразу (3.8):

$$Q_{\text{прихований}} = L \times W_{\text{прихований}}, \text{ [Вт} \times \text{м}^{-2}] \quad (3.8)$$

де  $L$  – прихована теплота випаровування води  $[\text{Дж} \times \text{кг}^{-2}]$ , що відповідає тепловій енергії, необхідній для випаровування одиниці маси або об'єму води. При нормальному атмосферному тиску  $L=2453$  кДж/кг;

$W_{\text{прихований}}$  – маса води, що перетворюється в пару з поверхні площею в  $1 \text{ м}^{-2}$  за одиницю часу,  $[\text{кг} \times \text{м}^{-2} \times \text{с}^{-1}]$ .

Оскільки вода міститься не лише в рослині, але й у ґрунті, то треба враховувати її випаровування й з цих об'єктів. Процес випаровування вологи рослинами називають транспірацією. Ще одним джерелом для випаровування води є конденсат на холодних поверхнях, таких як дах та стіни теплиці. Враховуючи вищесказане можна записати, що

$$W_{\text{прихований}} = W_{\text{транспірації}} + W_{\text{випаровування}} + W_{\text{конденсована}}, \quad (3.9)$$

де  $W_{\text{транспірації}}$  – вода, що випаровується рослинами в результаті транспірації;

$W_{\text{випаровування}}$  – вода, що випаровується з поверхні ґрунту;

$W_{\text{конденсована}}$  – вода, що випаровується з конденсату на холодних поверхнях.

В результаті аналізу кожного з компонентів енергетичного балансу (3.2)

запропоновано знехтувати такими процесами:

– втратами тепла на охолодження  $Q_{\text{охолодження}}$  у випадку зимової теплиці;

– надходженням тепла від ламп  $Q_{\text{лампа}}$  за рахунок використання світлодіодних ламп.

У підсумку пропонується таке диференціальне рівняння енергетичного балансу теплиці:

$$\begin{aligned} dT/dt = [ & \alpha_{\text{сонце}} \times I_{\text{сонце}} + Q_{\text{опалення}} - \nu \times C_p \times (T_1 - T_2) - \lambda \times (T_1 - T_2) - \\ & - \varepsilon_1 \times \varepsilon_2 \times \sigma \times ((T_1)^4 - (T_2)^4) - L \times W_{\text{прихований}} ] / c_{\text{сар,Q}}. \quad [^{\circ}\text{C}/\text{c}] \quad (3.10) \end{aligned}$$

Деякі сталі, взяті з фізичних довідників та наукових робіт, в яких досліджувалися такі ж процеси, наведені нижче:

–  $\alpha_{\text{сонце}} = 0,2$ ;

–  $C_p = 1000 \text{ [Дж} \times \text{м}^{-3} \times ^{\circ}\text{C}^{-1}\text{]}$ ;

–  $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ [Вт} \times \text{м}^{-2} \times \text{К}^{-4}\text{]}$ .

–  $L = 2453 \text{ [кДж/кг]}$ ;



$$- c_{\text{cap,Q}} = 30000 [\text{Дж} \times \text{м}^{-2} \times \text{°C}^{-1}].$$

В отриманій енергетичній моделі враховано вдвічі більше процесів, ніж в моделі Ван Хентена, але вона є простішою за модель Де Цварта.

Практична цінність отриманої моделі (3.10) полягає в можливості оцінити необхідну максимальну потужність системи опалення теплиці. Для цього уявимо, що Сонце може бути відсутнім, а температура – незмінною. З урахуванням таких припущень рівняння (3.10) перетвориться у вираз:

$$Q_{\text{опалення}} = v \times c \times (T_1 - T_2) + \lambda \times (T_1 - T_2) + \\ + \varepsilon_1 \times \varepsilon_2 \times \sigma \times ((T_1)^4 - (T_2)^4) + L \times W_{\text{прихований}}. \quad (3.11)$$

Враховуючи, що потужність системи опалення  $P_{\text{опалення}}$  зв'язана з тепловою  $Q_{\text{опалення}}$  виразом

$$P_{\text{опалення}} = 1,13 \times Q_{\text{опалення}} \times S_{\text{теплиці}} / \eta \quad [\text{Вт}] \quad (3.12)$$

для певного матеріалу покрівлі з коефіцієнтом теплопровідності  $\lambda$  та площею теплиці  $S_{\text{теплиці}}$ .

Тут коефіцієнт 1,13 враховує теплові втрати в системі опалення;

$S_{\text{теплиці}}$  – площа теплиці,  $[\text{м}^2]$ ;

$\eta$  – ККД котла або обігрівача.

З наведеної енергетичної моделі можна також розрахувати коефіцієнт теплопровідності  $\lambda$  для вибору матеріалу покрівлі теплиці або визначити площу теплиці, яку зможе опалити котел або обігрівач. Але оскільки дана робота спрямована не на проєктування обладнання та самої теплиці, а на дослідження системи керування параметрами мікроклімату, то розглянемо наступну модель.

### 3.3.3 Модель балансу водяної пари

Аналогічно до енергетичної моделі існують багато моделей, що описують баланс водяної пари в теплиці. Однією з найпростіших моделей є модель Ван Хентена, що враховує лише два процеси:

$$dX_v/dt = (W_{\text{транспірація}} - W_{\text{вентиляція}}) / c_{\text{сар,в}}, \quad (3.13)$$

де  $c_{\text{сар,в}}$  – об'ємна пароемність повітря на одиницю площі теплиці [ $\text{м}^3 \times \text{м}^{-2}$ ].

Незважаючи на свою простоту модель Ван Хентена має недоліки, одним з яких є не врахування інших важливих процесів, що впливають на баланс водяної пари в повітрі теплиці. Не складно побачити, що при відсутності вентиляції ( $W_{\text{вентиляція}} = 0$ ) кількість водяної пари в теплиці за рахунок випаровування води рослинами ( $W_{\text{транспірація}}$ ) буде постійно зростати, що не відповідає дійсності. Тому варто розглянути моделі балансу водяної пари, в яких врахована більша кількість процесів.

В моделі (3.14) [17] враховані шість процесів

$$dM_v/dt = W_{\text{транспірація}} + W_{\text{випаровування}} + W_{\text{зволоження}} - \\ - W_{\text{конденсація}} - W_{\text{вентиляція}} - W_{\text{осушення}}, \quad [\text{кг} \times \text{м}^{-2} \times \text{с}^{-1}] \quad (3.14)$$

де  $W_{\text{транспірація}}$  – випаровування вологи рослиною (транспірація), [ $\text{кг} \times \text{м}^{-2} \times \text{с}^{-1}$ ];

$W_{\text{випаровування}}$  – випаровування вологи з одиниці площі поверхні ґрунту, [ $\text{кг} \times \text{м}^{-2} \times \text{с}^{-1}$ ];

$W_{\text{зволоження}}$  – штучне додавання вологи у вигляді туману, зрошення, розпилення тощо;

$W_{\text{конденсація}}$  – вода, що конденсується з водяної пари на холодних поверхнях;

$W_{\text{вентиляція}}$  – втрата води крізь вентиляційний отвір, [ $\text{кг} \times \text{м}^{-2} \times \text{с}^{-1}$ ];

$W_{\text{осушення}}$  – зменшення вологості повітря теплиці за рахунок штучного примусового осушення.

Варто зазначити, що вода, що випаровується рослинами в процесі транспірації може бути отримана останніми з ґрунту або від зрошення. Тому в моделі балансу водяної пари між процесами транспірації та зволоження можуть біти певні співвідношення.

Проте в моделі балансу водяної пари (3.15) [20] описані чотири процеси:

$$dX_v/dt=(W_{\text{транспірація}} - W_{\text{конд. покриття}} - W_{\text{конд. теплообмінник}} - W_{\text{вентиляція}})/h, \quad [\text{Г}\times\text{М}^{-3}\times\text{с}^{-1}] \quad (3.15)$$

де  $W_{\text{конд. покриття}}$  – вода, що конденсується з водяної пари на внутрішній поверхні покриття теплиці;

$W_{\text{конд. теплообмінник}}$  – вода, що конденсується з водяної пари на холодних елементах теплообмінника;

$h$  – висота теплиці.

Порівнявши ці три моделі балансу водяної пари (3.13 – 3.15) можна зробити висновок, що спільними для них є процеси транспірації та вентиляції. В моделях (3.14) та (3.15) ще також враховані процеси конденсації, причому в (3.15) конденсація поділена на дві складові: на поверхні покриття теплиці ( $W_{\text{конд. покриття}}$ ) та на елементах системи теплообміну ( $W_{\text{конд. теплообмінник}}$ ). Найбільша кількість процесів, що беруть участь у балансі водяної пари, містить модель (3.14).

Для вибору домінуючих факторів, достатніх для математичного моделювання балансу водяної пари в теплиці, розглянемо кожний з процесів, наведених у (3.14), окремо.

Випаровування вологи рослинами в процесі транспірації ( $W_{\text{транспірація}}$ ) залежить від багатьох факторів таких як площа листа рослини, вологості повітря, концентрації вуглецевого газу тощо. В деяких моделях наводять процес транспірації за лінійну функцію, що залежить лише від інтенсивності сонячного випромінення та виду рослини, нехтуючи іншими чинниками. В роботі [22] проаналізовані моделі транспірації тепличних культур. Автори цієї роботи пропонують для визначення

кількості випаруваної пари в результаті транспірації використовувати формулу Пенмана-Монтейта з урахуванням коефіцієнту, що враховує площу листа рослини:

$$W_{\text{транспірація}} = (\Delta k \times R_n - k_s \times \rho \times C_p \times D_i \times g_a) / L \times (\Delta k + \gamma (1 + g_a/g_c)), \quad (3.16)$$

де  $\Delta k$  – дотична до графіку залежності між температурою ( $T$ ) та тиском насиченої пари ( $p_{\text{насичення}}$ ) (графічному відображенню психрометричної діаграми) у точці, що відповідає вимірній температурі повітря теплиці, [кПа/К];

$R_n$  – сонячне випромінення, що перехоплює листя рослини, [Вт  $\times$  м<sup>-2</sup>];

$k_s$  – коефіцієнт індексу площі листа рослини, що показує, яку площу займає листя рослини по відношенню до площі ґрунту теплиці;

$\rho$  – густина повітря, яку можна визначити з рівняння Клапейрона. Вона може змінюватися від 1,2754 кг/м<sup>3</sup> при температурі 0 °С до 1,2041 кг/м<sup>3</sup> при температурі 20 °С. Враховуючи, що температура всередині теплиці знаходиться в межах від 10 °С до 20 °С приймемо  $\rho = 1,23$  кг/м<sup>3</sup>;

$C_p$  – питома теплоємність повітря, яка дорівнює 1,005 кДж $\times$ кг<sup>-1</sup> $\times$ °С<sup>-1</sup>;

$D_i$  – дефіцит тиску пари, що характеризує різницю між кількістю водяної пари в повітрі та її кількістю, що відповідає насиченню, тобто максимально можливою кількістю пари при заданій температурі. Дефіцит тиску можна записати через тиск насичення  $p_{\text{насичення}}$  та відносну вологість  $\phi$  так:

$$D_i = p_{\text{насичення}} \times (1 - \phi/100). \quad [\text{кПа}] \quad (3.17)$$

Тиск насичення  $p_{\text{насичення}}$  залежить від температури повітря і може бути визначений по психрометричній діаграмі або розрахований по відомій формулі Арреніуса. Відносну вологість  $\phi$  можна виміряти за допомогою вологоміра;

$\gamma$  – психрометрична константа ( $\gamma = 66$  Па/К);

$L$  – прихована теплота випаровування води.  $L=2453$  кДж/кг;

$g_a$  – аеродинамічна провідність рослини, [м/с]. Вона пов’язана з передаванням тепла та випаровуванням води з поверхні листів рослини у повітря теплиці та залежить від швидкості руху повітря (вітру);

$g_c$  – продихова провідність рослини, [м/с] відома для кожної з культур і навіть сортів однієї культури. Її значення збільшується для початкових етапів росту рослини та зменшується під час старіння рослини та дозрівання врожаю. Також продихова провідність залежить від клімату, температури, вологості ґрунту, концентрації вуглецевого газу, що описано вище (див. п.2.4) тощо. В загальному випадку таку залежність можна описати формулою [17]:

$$g_c = g_{\max} \times f(R_n) \times f(D_i) \times f(T_i) \times f(\text{CO}_2), \quad (3.17)$$

де  $g_{\max}$  – максимальна продихова провідність;

$R_n$  – сонячне випромінювання, що перехоплює листя;

$D_i$  – дефіцит тиску пари;

$T_i$  – температура тепличного повітря;

$\text{CO}_2$  – концентрація вуглецевого газу.

В моделі Ван Хентена [21] процес транспірації ( $W_{\text{транспірація}}$ ) описаний виразом:

$$W_{\text{транспірація}} = \{1 - \exp(-c_{\text{pl,dry}} \times X_{\text{dry}})\} \times c_{\text{v,pl,ai}} \times \{(c_{\text{v,1}} / R) \times (T + 273) \times \exp(c_{\text{v,2}} \times T / (T + c_{\text{v,3}})) - \Delta, \quad (3.18)$$

де  $c_{\text{pl,dry}}$  – ефективна поверхня крони рослини, [м<sup>2</sup>] у розрахунку до 1 кг сухої речовини рослини; для салату  $c_{\text{pl,dry}} = 53$  [м<sup>2</sup> × кг<sup>-1</sup>];

$c_{\text{v,pl,ai}}$  – коефіцієнт масообміну водою з поверхні листів рослини;

$$c_{\text{v,pl,ai}} = 3,6 \times 10^{-3} [\text{м} \times \text{с}^{-1}];$$

$X_{\text{dry}}$  – маса сухої речовини врожаю, [кг × м<sup>-2</sup>];

$c_{\text{v,1}}$ ,  $c_{\text{v,2}}$  і  $c_{\text{v,3}}$  – параметризований тиск насиченої водяної пари;

$$c_{v,1} = 9348 \text{ [Дж} \times \text{м}^{-3}\text{]}; c_{v,2} = 17,4; c_{v,3} = 239 \text{ [}^\circ\text{C]};$$

$$R - \text{газова стала}; R = 8,31 \text{ [Дж} \times \text{К}^{-1} \times \text{моль}^{-1}\text{]};$$

$$T - \text{температура парникового повітря, [}^\circ\text{C]};$$

$$\Delta - \text{абсолютна вологість тепличного повітря, [кг} \times \text{м}^{-3}\text{]};$$

$\{(c_{v,1} / R) \times (T + 273) \times \exp(c_{v,2} \times T / (T + c_{v,3}))\}$ ,  $[\text{кг} \times \text{м}^{-3}]$  описує абсолютну вологість насиченої пари при температурі повітря  $T$ .

На відміну від виразу (3.16), що описує процес транспірації, в моделі Ван Хентена не врахована залежність транспірації від сонячного випромінення та концентрації вуглецевого газу у повітрі теплиці.

Кількість вологи, що випаровується з поверхні ґрунту  $W_{\text{випаровування}}$ , можна визначити із закону Дальтона або з рівняння Герца – Кнудсена [23].

В моделях балансу водяної пари (3.14) та (3.15) врахований процес конденсації пари на холодних поверхнях. Це явище пов'язане з тим, що навіть при кімнатній температурі, на багато нижчій за температуру її переходу в газоподібний стан (100 °C), деяка частина води випаровується і розчиняється в повітрі. Кількість розчиненої води в повітрі називають абсолютною вологістю  $\Delta$ ,  $[\text{г}/\text{м}^3]$ . Максимальна кількість розчиненої пари залежить від температури повітря. Наприклад, при температурі 25 °C максимальна вологість становить 20  $\text{г}/\text{м}^3$ , то при 0 °C вона менша за 5  $\text{г}/\text{м}^3$ . Для такого випадку пару називають насиченою, а температуру насичення – точкою роси. Кількість водяної пари у повітрі можна визначити вимірявши такий параметр як відносну вологість  $\phi$ , з урахуванням того, що вологості у 100 % відповідає насичена пара при температурі точці роси. Якщо повітря охолодити нижче точки роси, то кількість води, що міститься у вигляді пари в повітрі, перетвориться у воду. Такий процес називається конденсацією. Конденсація води може відбуватися і на холодних поверхнях, температура яких нижча за точку роси. Тоді вимірявши відносну вологість повітря, температуру повітря та охолодженої поверхні за таблицями або онлайн калькулятором [24] можна визначити скільки конденсується вологи ( $W_{\text{конденсація}}$ ).

Втрати вологи через вентиляційні отвори ( $W_{\text{вентиляція}}$ ) можна визначити подібно до втрати тепла (3.5), тобто

$$W_{\text{вентиляція}} = v \times (\Delta_1 - \Delta_2), \text{ [Г} \times \text{М}^{-2} \times \text{с}^{-1}] \quad (3.19)$$

де  $v$  – швидкість повітрообміну, [м/с];

$\Delta_1$  та  $\Delta_2$  – абсолютні вологості повітря всередині та ззовні теплиці відповідно, [г/м<sup>3</sup>].

Витрату води під час штучного зволоження повітря теплиці  $W_{\text{зволоження}}$  можна виміряти за допомогою лічильника води, а витрати води за одиницю часу – за допомогою витратоміра. Кількість води, що насичує повітря в результаті зволоження є регульованим параметром.

В протилежність до зволоження може використовуватися процес осушення повітря. Осушення може здійснюватися такими методами:

- нагрівання повітря;
- вентиляція;
- конденсаційне осушення;
- абсорбційне осушення.

Принцип роботи обладнання для осушення повітря за рахунок його нагрівання схожий за принципом роботи фену. Збільшення температури тепличного повітря під час нагрівання може призвести до створення несприятливих умов для розвитку рослин та зменшення врожайності. Тому такий метод для тепличного господарства використовувати не будемо.

Зменшення вологості повітря за рахунок природничої вентиляції описане виразом (3.19). Використання вентиляторів призведе до збільшення швидкості повітрообміну  $v$  в (3.19), але в цілому вираз можна використати для опису процесу вентиляції.

Конденсаційне осушення здійснюється за рахунок конденсації водяної пари при спрямуванні повітря через штучно охолоджену до температури, нижчої за точку роси, поверхню випаровувача. Такий метод є більш економічним та ефективним, але вимагає подальшого нагрівання повітря.

Принцип абсорбційного осушення полягає у абсорбції вологи гігроскопічними матеріалами. Такий метод є більш складний та дорогий порівняно з іншими методами.

Проаналізувавши всі процеси моделі балансу водяної пари (3.14) її можна спростити за рахунок врахування процесу осушення ( $W_{\text{осушення}}$ ) у процесах вентиляції ( $W_{\text{вентиляція}}$ ) або конденсації ( $W_{\text{конденсація}}$ ) залежно від вибраного метода осушення.

Підтримувати задану вологість повітря теплиці можна за рахунок керування процесами зволоження (для збільшення вологості) та вентиляції (для зменшення вологості). Окрім зволоження та вентиляції в моделі варто врахувати процеси транспірації, випаровування з поверхні ґрунту та конденсації води на холодних поверхнях.

За допомогою балансу водяної пари можна визначити витрати води в розрахунку на одиницю площі тепличних культур, загальні потреби у воді та витрати на зрошення всього тепличного господарства. Такі розрахунки є особливо важливими під час вирощування рослин при дефіциті водних ресурсів.

### ***3.3.4 Модель балансу вуглецевого газу***

Ще одним важливим параметром мікроклімату теплиці, що суттєво впливає на врожайність тепличних культур, є концентрація  $\text{CO}_2$  в повітрі. Вуглецевий газ є головною складовою процесу фотосинтезу, під час якого в рослинах утворюються цукор при наявності світла. В результаті фотосинтезу концентрація вуглецевого газу в повітрі стрімко зменшується. Вночі, коли світло відсутнє, рослини видихають  $\text{CO}_2$ , але кількість видихненого вуглецевого газу на багато менша за спожиту під час фотосинтезу. Отже, біологічні процеси, що відбуваються в рослинах, зменшують концентрацію  $\text{CO}_2$  в повітрі. Також концентрація вуглецевого газу може



зменшуватися під час вентиляції теплиці. Для підтримання певної концентрації CO<sub>2</sub> в повітрі теплиці необхідно штучно додавати вуглецевий газ. Виходячи з таких міркувань можна записати баланс концентрації CO<sub>2</sub>:

$$dCO_2/dt = CO_{2, \text{джерела}} + CO_{2, \text{дыхання}} - CO_{2, \text{фотосинтез}} \pm CO_{2, \text{вентиляція}}, \quad [кг \times м^{-2} \times с^{-1}] \quad (3.20)$$

де CO<sub>2, джерела</sub> – збагачення повітря вуглецевим газом зі штучного джерела CO<sub>2</sub>;

CO<sub>2, дихання</sub> – видихання вуглецевого газу рослинами вночі під час відсутності фотосинтезу;

CO<sub>2, фотосинтез</sub> – споживання вуглецевого газу рослинами в процесі фотосинтезу;

CO<sub>2, вентиляція</sub> – зміна концентрації вуглецевого газу в теплиці через вентиляцію.

Варто зауважити, що в результаті вентиляції складова балансу CO<sub>2</sub> тепличного повітря може бути додатною або від’ємною залежно від того, де концентрація вуглецевого газу більша – в повітрі теплиці або довкілля.

Оскільки за рахунок збільшення концентрації CO<sub>2</sub> в 2 – 4 рази можна суттєво збільшити врожайність тепличних культур (див. дослідження розділу 2), то в моделі будемо використовувати штучне джерело збагачення CO<sub>2, джерела</sub> тепличного повітря вуглецевим газом, а складова CO<sub>2, вентиляція</sub> буде від’ємною.

Для перевірки адекватності запропонованої моделі балансу CO<sub>2</sub> (3.20) проаналізуємо існуючі моделі.

В моделі [17] враховані лише три процеси:

$$dCO_2/dt = CO_{2, \text{джерело}} - CO_{2, \text{фотосинтез}} - CO_{2, \text{вентиляція}} \cdot [кг \times м^{-2} \times с^{-1}] \quad (3.21)$$

В моделі [21] також враховані лише три процеси:

$$dCO_2/dt = 1/h \times [\phi_{\text{джерело}} - \phi_{\text{рослина}} - \phi_{\text{вентиляція}}], \quad [кг \times м^{-3} \times с^{-1}] \quad (3.22)$$

де  $\Phi_{\text{рослина}}$  – кількість вуглецевого газу, що спожила рослина;

$h$  – висота теплиці.

В цій моделі не розглядаються біологічні процеси в рослині, що впливають на зміну концентрації  $\text{CO}_2$  в повітрі теплиці, а враховується їх спільний вплив.

В моделі Ван Хентена [21] враховані чотири процеси (3.23)

$$d\text{CO}_2/dt = 1/c_{\text{сар,CO}_2} \times [-\Phi_{\text{фотосинтез}} + c_{\text{дыхання}} \times X_{\text{dry}} \times 2^{(0,1T - 2,5)} + \Phi_{\text{джерело}} - \Phi_{\text{вентиляція}}],$$

[кг×м<sup>-3</sup>×с<sup>-1</sup>] (3.23)

де:  $c_{\text{сар,CO}_2}$  – об'ємна місткість  $\text{CO}_2$  у тепличному повітрі.  $c_{\text{сар,CO}_2} = 4,1$  [м<sup>3</sup> × м<sup>-2</sup>];

$\Phi_{\text{фотосинтез}}$  – швидкість фотосинтезу, [кг × м<sup>-2</sup> × с<sup>-1</sup>];

$c_{\text{дыхання}}$  – дихальний коефіцієнт, [с<sup>-1</sup>];

$\Phi_{\text{джерело}}$  – швидкість надходження  $\text{CO}_2$  від джерела вуглецевого газу, [кг×м<sup>-2</sup>×с<sup>-1</sup>];

$\Phi_{\text{вентиляція}}$  – втрата  $\text{CO}_2$  через вентиляційні отвори, [кг × м<sup>-2</sup> × с<sup>-1</sup>];

$X_{\text{dry}}$  – маса сухої речовини рослини на одиницю площі ґрунту теплиці, [кг × м<sup>-2</sup>];

$T$  – температура рослини, [°C].

Модель балансу вуглецевого газу Ван Хентена (3.23) враховує залежність концентрації  $\text{CO}_2$ , що видихає рослина, від типу рослини ( $c_{\text{дыхання}}$ ), площі її листів, що пов'язана з масою сухої рослини ( $X_{\text{dry}}$ ), та температурою повітря в теплиці ( $T$ ). Вона є більш прозорою, описує так ж процеси, що й запропонована в цій роботі (3.20), та може бути узята за основу.

Проаналізуємо процеси фотосинтезу та вентиляції, що наведені в моделі (3.23).

Процес фотосинтезу полягає в перетворенні води та вуглецевого газу під впливом світла у цукор. Під час фотосинтезу рослина споживає вуглецевий газ з повітря, за рахунок чого його концентрація зменшується. Більш детальний якісний опис процесу фотосинтезу описаний в п. 2.1.

В моделі Ван Хентена [21] запропоновано швидкість фотосинтезу з одиниці площі поверхні листа рослини описати таким виразом:

$$\Phi_{\text{фотосинтез}} = \{1 - \exp(-c_{\text{pl,d}} \times X_{\text{dry}})\} \times \{c_{\text{grad, phot}} \times I_{\text{світло}} \times (-c_{\text{CO}_2, 1} \times T^2 + c_{\text{CO}_2, 2} \times T - c_{\text{CO}_2, 3})(\text{CO}_2 - c_{\Gamma})\} / \{c_{\text{grad, phot}} \times I_{\text{світло}} + (-c_{\text{CO}_2, 1} \times T^2 + c_{\text{CO}_2, 2} \times T - c_{\text{CO}_2, 3})(\text{CO}_2 - c_{\Gamma})\},$$

$$[\text{кг} \times \text{м}^{-3} \times \text{с}^{-1}] \quad (3.24)$$

де  $c_{\text{pl,dry}}$  – ефективна поверхня крони рослини [ $\text{м}^2$ ] у розрахунку до 1 кг сухої речовини рослини; для салату  $c_{\text{pl,dry}} = 53 [\text{м}^2 \times \text{кг}^{-1}]$ ;

$X_{\text{dry}}$  – маса сухої речовини врожаю, [ $\text{кг} \times \text{м}^{-2}$ ];

$c_{\text{grad, phot}}$  – ефективність використання світла – частка випромінення, яке бере участь у процесі фотосинтезу.  $c_{\text{grad, phot}} = 15,3 \times 10^{-9} [\text{кг} \times \text{Дж}^{-1}]$ ;

$I_{\text{світло}}$  – потужність світлового випромінення на одиницю площі поверхні теплиці, [ $\text{Вт} \times \text{м}^{-2}$ ];

$c_{\text{CO}_2, 1}$ ,  $c_{\text{CO}_2, 2}$ , і  $c_{\text{CO}_2, 3}$  – параметризований вплив температури на процес фотосинтезу;

$c_{\text{CO}_2, 1} = 5,11 \times 10^{-6} [\text{м} \times \text{с}^{-1} \times ^\circ\text{C}^{-2}]$ ;  $c_{\text{CO}_2, 2} = 2,3 \times 10^{-4} [\text{м} \times \text{с}^{-1} \times ^\circ\text{C}^{-1}]$ ;

$c_{\text{CO}_2, 3} = 6,29 \times 10^{-4} [\text{м} \times \text{с}^{-1}]$ ;

$T$  – температура парникового повітря, [ $^\circ\text{C}$ ];

$\text{CO}_2$  – концентрація вуглецевого газу в повітрі, [ $\text{кг} \times \text{м}^{-3}$ ];

$c_{\Gamma}$  – точка компенсації вуглецевого газу.  $c_{\Gamma} = 5,2 \times 10^{-5} [\text{кг} \times \text{м}^{-3}]$ ;

$f\{1 - \exp(-c_{\text{pl,d}} \times X_{\text{dry}})\}$  описує фотосинтетичні властивості рослини;

$c_{\text{grad, phot}} \times I_{\text{світло}}$  визначає потужність світлового випромінення;

$(-c_{\text{CO}_2, 1} \times T^2 + c_{\text{CO}_2, 2} \times T - c_{\text{CO}_2, 3})$  відображає вплив температури на процес фотосинтезу.

Підставляючи значення коефіцієнтів у вираз (3.24) отримаємо залежність

$$\Phi_{\text{фотосинтез}} = f_1(X_{\text{dry}}) \times f_2(I) \times f_3(T) \times f_4(\text{CO}_2) / \{f_2(I) + f_3(T) \times f_4(\text{CO}_2)\}. \quad (3.25)$$

Аналогічно до енергетичного балансу та балансу водяної пари для втрати вуглецевого газу в процесі вентиляції можна записати схожий вираз:

$$\Phi_{\text{вентиляція}} = v \times (\text{CO}_{2,1} - \text{CO}_{2,2}), \text{ [кг} \times \text{м}^{-2} \times \text{с}^{-1}\text{]}, \quad (3.26)$$

де  $v$  – швидкість повітрообміну, [м/с];

$\text{CO}_{2,1}$  та  $\text{CO}_{2,2}$  – концентрація вуглецевого газу всередині та ззовні теплиці відповідно, [кг/м<sup>3</sup>].

З балансу  $\text{CO}_2$  можна визначити необхідну мінімальну продуктивність джерела вуглецевого газу:

$$\Phi_{\text{джерело}} = \Phi_{\text{фотосинтез}} + c_{\text{дихання}} \times X_{\text{dry}} \times 2^{(0,1T - 2,5)} + \Phi_{\text{вентиляція}}. \quad (3.27)$$

Враховуючи, що в моделі балансу вуглецевого газу присутній такий елемент як маса сухої речовини рослини  $X_{\text{dry}}$ , проаналізуємо рівняння, що описує зміну маси рослини, тобто модель врожаю або модель росту.

### ***3.3.5 Модель росту***

За початкову модель росту виберемо модель Ван Хентена [21]. Автор запропонував математичну модель росту, що описувала вплив біологічних процесів та параметрів мікроклімату теплиці на збільшення маси рослини. Для перевірки адекватності моделі росту Ван Хентен провів експериментальні дослідження. За тепличну культуру був вибраний салат. Як стверджує автор, експериментальні результати підтвердили математичну модель росту салату з високим ступенем кореляції (відхилення не перевищували 5%). Такі твердження підштовхнули до вивчення моделі росту Ван Хентена, аналізу та виявлення можливості її вдосконалення або спрощення.

Збільшення ваги салату оцінювалося за сухою масою салату, причому остання була поділена на дві складові: структурна  $X_{\text{стр}}$  та неструктурна  $X_{\text{нстр}}$  суха маса. Структурна складова являє собою такі структурні компоненти як цитоплазма та клітинні стінки. Неструктурна суха маса містить утворенні за допомогою процесу фотосинтезу крохмаль, глюкозу та сахарозу.

В моделі Ван Хентена вважається, що на збільшення неструктурної складової впливають процеси фотосинтезу, дихання та збільшення маси структурної складової. Збільшення маси структурної складової пропорційно до її маси. Отже, рівняння росту Ван Хентена мають такий вигляд:

$$\begin{aligned} dX_{\text{нстр}}/dt &= c_{\alpha} \times f_{\text{фотосинтез}} - v_{\text{росту}} \times X_{\text{стр}} - f_{\text{дихання}} - ((1 - c_{\beta}) / c_{\beta}) \times v_{\text{росту}} \times X_{\text{стр}}; [\text{кг} \times \text{м}^{-2} \times \text{с}^{-1}] \\ dX_{\text{стр}}/dt &= v_{\text{росту}} \times X_{\text{стр}}, \end{aligned} \quad (3.28)$$

де  $f_{\text{фотосинтез}}$  – швидкість збільшення маси рослини за рахунок фотосинтезу;

$f_{\text{дихання}}$  – зменшення маси рослини в процесі видихання вуглецевого газу;

$v_{\text{росту}}$  – питома швидкість росту структурної складової,  $[\text{с}^{-1}]$ ;

$c_{\alpha}$ ,  $c_{\beta}$  – коефіцієнти;

$- v_{\text{росту}} \times X_{\text{стр}}$  – зменшення маси неструктурної складової за рахунок перетворення її у структурну;

коефіцієнт  $((1 - c_{\beta}) / c_{\beta})$  враховує збільшення втрат маси на синтез і дихання при рості рослини, тобто її структурної складової; для салату  $c_{\beta} = 0,8$ , а  $((1 - c_{\beta}) / c_{\beta}) = 0,25$ ;

коефіцієнт  $c_{\alpha}$  розрахований з тим припущенням, що в процесі фотосинтезу відбувається перетворення вуглецевого газу у глюкозу, а відношення молекулярних мас глюкози та вуглецевого газу становлять  $30/44 = 0,68$ , тобто  $c_{\alpha} = 0,68$ .

Вже на цьому етапі досліджень рівняння росту Ван Хентена для неструктурної складової можна спростити до вигляду

$$dX_{\text{нстр}}/dt = c_{\alpha} \times f_{\text{фотосинтез}} - f_{\text{дихання}} - v_{\text{росту}} \times X_{\text{стр}} / c_{\beta}; \quad (3.29)$$

Швидкість перетворення ( $r_{\text{росту}}$ ) неструктурної складової ( $X_{\text{нстр}}$ ) у структурну ( $X_{\text{стр}}$ ) залежить від їх співвідношення, температури та досягає насичення швидкості. Ці залежності можна записати у такому вигляді:

$$v_{\text{росту}} = c_{\text{росту, max}} \times \{X_{\text{нстр}} / (c_{\gamma} \times X_{\text{стр}} + X_{\text{нстр}})\} \times c_{\text{росту}}^{(T-20)/10}, \quad (3.30)$$

де  $c_{\text{росту, max}}$  – насичення швидкості росту тепличної культури. При температурі 20 °С  $c_{\text{росту, max}} = 5 \times 10^{-6} [\text{с}^{-1}]$ ;

$c_{\gamma}$  – коефіцієнт, що враховує внесок структурної і неструктурної складових у швидкість росту.  $c_{\gamma}$  набуває значення в межах від 0,5 до 1. Отже, вираз у фігурних дужках буде меншим за одиницю;

$c_{\text{росту}}$  – коефіцієнт, що враховує залежність швидкості росту від температури з нормуванням до температури 20 °С.  $c_{\text{росту}} = 1,6$ .

Процес дихання рослини ( $f_{\text{дихання}}$ ) відбувається як через її листя так і через коріння, а також залежить від розмірів рослини та температури:

$$f_{\text{дихання}} = \{c_{\text{дихання, листя}} \times (1 - c_T) \times X_{\text{стр}} + c_{\text{дихання, корінь}} \times c_T \times X_{\text{стр}}\} \times c_{\text{дихання}}^{(T-25)/10}, \quad (3.31)$$

де  $c_{\text{дихання, листя}}$  та  $c_{\text{дихання, корінь}}$  – коефіцієнти, що характеризують втрату глюкози одиницею маси рослини в процесі дихання через листя та корені відповідно. Для салату експериментально визначено, що  $c_{\text{дихання, листя}} = 3,47 \times 10^{-7} [\text{с}^{-1}]$ ;

$$c_{\text{дихання, корінь}} = 1,16 \times 10^{-7} [\text{с}^{-1}].$$

$c_T$  – коефіцієнт, що виражає яку частину від загальної структурної маси складає коріння. Для салату коріння складає 15% від всієї маси рослини. Отже,  $c_T = 0,15$ ;

$(1 - c_T)$  – коефіцієнт, що виражає яку частину від загальної структурної маси складає листя. Для салату листя складає 85% від всієї маси рослини.

$$\text{Отже, } (1 - c_T) = 0,85;$$

$c_{\text{дихання}}$  – коефіцієнт, що враховує залежність швидкості дихання від температури з нормуванням до температури 25 °С.  $c_{\text{дихання}} = 2$ .

Проаналізувавши вираз (3.21), пропонується для зручності перетворити його до такого:

$$f_{\text{дихання}} = \{c_{\text{дихання, листя}} + c_T \times (c_{\text{дихання, корінь}} - c_{\text{дихання, листя}})\} \times X_{\text{стр}} \times c_{\text{дихання}}^{(0,1T-2,5)}. \quad (3.32)$$

Збільшення ваги неструктурної складової рослини за рахунок процесу фотосинтезу можна описати таким емпіричним виразом:

$$f_{\text{фотосинтез}} = \{1 - \exp(-c_K \times k_{\text{листя}} \times (1 - c_T) \times X_{\text{стр}})\} \times f_{\text{фотосинтез, max}}, \quad (3.33)$$

де  $c_K$  – коефіцієнт, що враховує спосіб орієнтації листу. У випадку горизонтальної орієнтації листу рослини, що називають планофілами, коефіцієнт  $c_K = 0,9$ ; у випадку вертикальної орієнтації листу рослини, що називають еректофілами,  $c_K = 0,3$ . Салат є більше планофільною культурою, ніж еректофільною, оскільки його листя знаходяться в горизонтальній площі. Тоді виберемо  $c_K = 0,9$ ;

$k_{\text{листя}}$  – коефіцієнт площі листя, що показує яка площа листа відповідає одиниці маси сухої структурної складової рослини. Для салату експериментально було визначено, що  $k_{\text{листя}} = 0,075 [\text{м}^2 \times \text{г}^{-1}] = 75 [\text{м}^2 \times \text{кг}^{-1}]$ ;

$f_{\text{фотосинтез, max}}$  – швидкість збільшення маси рослини за рахунок фотосинтезу у випадку повного покриття поверхні ґрунту листями,  $[\text{кг} \times \text{м}^{-2} \times \text{с}^{-1}]$ ;

$(1 - c_T)$  – коефіцієнт, що виражає яку частину від загальної структурної маси складає листя. Для салату  $(1 - c_T) = 0,85$ ;

множник  $k_{\text{листя}} \times (1 - c_T) \times X_{\text{стр}}$  називають індексом площі листя;

вираз у фігурних дужках (3.33)  $\{1 - \exp(-c_K \times k_{\text{листя}} \times (1 - c_T) \times X_{\text{стр}})\}$  показує у скільки разів швидкість збільшення маси рослини за рахунок фотосинтезу менша від максимально можливої при повному покритті ґрунту листями. Він враховує, що листя

покривають ґрунт не повністю. У випадку повного покриття ґрунту листями рослини цей вираз дорівнює одиниці.

Оскільки швидкість фотосинтезу залежить від концентрації вуглецевого газу, інтенсивності світлового випромінювання температури та площі листа (див. (3.24) та (3.25)) Ван Хентен пропонує записати таку залежність у вигляді

$$f_{\text{фотосинтез, max}} = \{c_{\text{рад, phot}} \times I_{\text{світло}} \times g_{\text{CO}_2} \times \rho_{\text{CO}_2} \times (\text{CO}_2 - \Gamma)\} / \{c_{\text{рад, phot}} \times I_{\text{світло}} + g_{\text{CO}_2} \times \rho_{\text{CO}_2} \times (\text{CO}_2 - \Gamma)\}, \quad (3.34)$$

де  $c_{\text{рад, phot}}$  – ефективність використання світла – частка випромінювання, яке бере участь у процесі фотосинтезу,  $[\text{кг} \times \text{Дж}^{-1}]$ ;

$I_{\text{світло}}$  – потужність фотосинтетично активного світлового випромінювання на одиницю площі поверхні теплиці,  $[\text{Вт} \times \text{м}^{-2}]$ ;

$g_{\text{CO}_2}$  – провідність листів для дифузії вуглецевого газу крізь їх поверхню,  $[\text{м}/\text{с}]$ ;

$\rho_{\text{CO}_2}$  – густина вуглецевого газу;  $\rho_{\text{CO}_2} = 1,83 \times 10^{-3} [\text{г} \times \text{м}^{-3}] = 1,83 \times 10^{-6} [\text{кг} \times \text{м}^{-3}]$ ;

$\text{CO}_2$  – концентрація вуглецевого газу в повітрі  $[\text{ppm}]$ ;

$\Gamma$  – точка компенсації вуглецевого газу, яка відповідає фотодиханню при високому рівні освітленості  $[\text{ppm}]$ . Точка компенсації залежить від температури так:

$$\Gamma = c_{\Gamma} \times c_{\text{компенсації}}^{(T-20)/10}, \quad (3.35)$$

де  $c_{\Gamma}$  – точка компенсації вуглецевого газу при температурі 20 °C;  $c_{\Gamma} = 40 [\text{ppm}]$ ;

$c_{\text{компенсації}}$  – коефіцієнт, що враховує вплив температури на точку компенсації;  $c_{\text{компенсації}} = 2$ .

Ефективність використання світла  $c_{\text{рад, phot}}$  можна розрахувати за таким виразом:

$$c_{\text{рад, phot}} = c_{\text{ефективн}} \times (\text{CO}_2 - \Gamma) / (\text{CO}_2 + 2\Gamma), \quad (3.36)$$



де  $c_{\text{ефективн}}$  – ефективність використання світла під час високої концентрації вуглецевого газу;  $c_{\text{ефективн}} = 17 \times 10^{-6} [\Gamma \times \text{Дж}]$ .

Провідність листів для дифузії вуглецевого газу крізь їх поверхню  $g_{\text{CO}_2}$  складається з двох фізичних провідностей і одної хімічної. До фізичних провідностей відносяться провідність приповерхневого шару  $g_{\text{поверхн}}$  та устьична провідність  $g_{\text{устьичн}}$ , до хімічної провідності – провідність карбоксилювання  $g_{\text{хімічна}}$ . Зв'язок між перерахованими провідностями можна записати у вигляді:

$$1/g_{\text{CO}_2} = 1/g_{\text{поверхн}} + 1/g_{\text{устьичн}} + 1/g_{\text{хімічна}} \quad (3.37)$$

Провідність приповерхневого шару  $g_{\text{поверхн}}$  залежить від швидкості вітру, різниці температур листя та тепличного повітря. Експериментально визначено, що для салати при різниці температур  $5 \text{ }^\circ\text{C}$  та швидкості вітру  $0,1 \text{ м/с}$ , що характерно для теплиці,  $g_{\text{поверхн}} = 0,007 [\text{м} \times \text{с}^{-1}]$ .

Устьична провідність залежить від стану рослини та наявності факторів стресу для рослини. При відсутності стресу експериментально визначена устьична провідність салату для вуглецевого газу становила  $0,005 [\text{м} \times \text{с}^{-1}]$ .

Провідність карбоксилювання  $g_{\text{хімічна}}$  залежить від температури. Для салату вона набуває максимального значення  $g_{\text{хімічна.мах}} = 0,004$  при температурі  $17,5 \text{ }^\circ\text{C}$  і наближається до нуля при температурах  $5$  і  $40 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Для діапазону температур від  $5 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  провідність карбоксилювання може бути описана таким виразом:

$$g_{\text{хімічн}} = c_{\text{хім, 1}} \times T^2 + c_{\text{хім, 2}} \times T + c_{\text{хім, 3}}, \quad [\text{м} \times \text{с}^{-1}] \quad (3.38)$$

де  $c_{\text{хім, 1}} = -1,32 \times 10^{-5} [\text{м} \times \text{с}^{-1} \times \text{ }^\circ\text{C}^{-2}]$ ;

$c_{\text{хім, 2}} = 5,94 \times 10^{-4} [\text{м} \times \text{с}^{-1} \times \text{ }^\circ\text{C}^{-1}]$ ;

$c_{\text{хім, 3}} = -2,64 \times 10^{-3} [\text{м} \times \text{с}^{-1}]$ .

Недолік моделі (3.28) полягає в складності оперативного визначення сухої маси рослини в процесі реального часу. Усунути його можна, якщо перейти від маси сухої рослини до площі її листя. Експериментально отримана формула для салату [23] має вигляд:

$$S_{\text{листя}} = ((1 - c_T) \times k_{\text{листя}} \times X_{\text{стр}}), \quad (3.39)$$

де  $(1 - c_T)$  – коефіцієнт, що виражає яку частину від загальної структурної маси складає листя; для салату  $(1 - c_T) = 0,85$ ;

$k_{\text{листя}}$  – коефіцієнт площі листя. Для салату  $k_{\text{листя}} = 0,075 \text{ [м}^2 \times \text{г}^{-1}\text{]}$ .

Якщо кількість рослин на одиницю площі дорівнює  $n$ , то можна визначити масу однієї рослини поділивши  $X_{\text{загальна}}$  на  $n$  і тоді вираз (3.39) набуде такого вигляду:

$$S_{\text{листя}} = ((1 - c_T) \times k_{\text{листя}} \times X_{\text{стр}}) / n. \quad (3.40)$$

Ще один недолік моделі росту (3.28) полягає у складності відокремити структурну складову від неструктурної. Такий поділ на складові важливий при подальшому використанні врожаю у процесі перероблення на виробництві. Що стосується салату, до якого адаптована ця модель, то його зазвичай вживають у сирому вигляді та продають за вагою в цілому, не поділяючи на складові. Тому перейдемо у моделі (3.28) від мас структурної ( $X_{\text{стр}}$ ) і неструктурної ( $X_{\text{нстр}}$ ) складових до загальної маси рослини ( $X_{\text{загальна}}$ ), враховуючи, що

$$X_{\text{загальна}} = X_{\text{стр}} + X_{\text{нстр}}. \quad [\text{г} \times \text{м}^{-2}] \quad (3.41)$$

Експериментальні данні з вирощування салату [21] показали, що маса сухої структурної складової однієї рослини становила 2 г, а неструктурної – лише 0,7 г. Отже, суха маса неструктурної складової становить приблизно 25 %  $(0,7 \times 100 / 2,7 =$

= 26 %) від загальної маси рослини і можна записати, що  $X_{\text{стр}} = 0,75 X_{\text{загальна}}$ ,  $X_{\text{нстр}} = 0,25 X_{\text{загальна}}$ .

Перехід до загальної сухої маси дає можливість спростити модель росту (3.28) до такого вигляду:

$$dX_{\text{загальна}}/dt = c_{\alpha} \times f_{\text{фотосинтез}} - f_{\text{дихання}} \quad [\text{г} \times \text{м}^{-2} \times \text{с}^{-1}] \quad (3.42)$$

### 3.3.6 Оціночні розрахунки параметрів моделі росту

Для виявлення можливості подальшого спрощення моделі росту (3.42) оцінимо внесок процесів фотосинтезу ( $f_{\text{фотосинтез}}$ ) та дихання ( $f_{\text{дихання}}$ ) у збільшення маси рослини. Всі показники виберемо по відношенню до салату. Початковими умовами для розрахунку будуть такі:

- температура повітря в теплиці  $T = 14 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- концентрація вуглецевого газу  $\text{CO}_2 = 750 \text{ ppm}$ ;
- маса сухої структурної складової  $X_{\text{стр}} = 2 \text{ г}$ .

Розрахуємо складову фотосинтезу за формулою (3.33)

Відомими є такі величини:

$$c_K = 0,9; k_{\text{листя}} = 0,075 [\text{м}^2 \times \text{г}^{-1}] = 75 [\text{м}^2 \times \text{кг}^{-1}]; (1 - c_T) = 0,85.$$

Невідомим є лише  $f_{\text{фотосинтез, max}}$ , який можна визначити із виразу (3.34), де відомими є  $\rho_{\text{CO}_2} = 1,83 \times 10^{-3} [\text{г} \times \text{м}^{-3}]$ ;  $\text{CO}_2 = 750 \text{ ppm}$ ;  $I_{\text{світло}} = 635 [\text{Вт} \times \text{м}^{-2}]$ , що відповідає середній інтенсивності випромінення Сонця на поверхні Землі. Невідомими є точка компенсації вуглецевого газу  $\Gamma$ , ефективність використання світла  $c_{\text{rad, phot}}$  та провідність листів для дифузії вуглецевого газу крізь їх поверхню  $g_{\text{CO}_2}$ .

$\Gamma$  можна визначити з виразу (3.35), для якого всі величини відомі.

$$\Gamma = 40 \times 2^{(14-20)/10} = 26,4 [\text{ppm}].$$

$c_{\text{grad, phot}}$  ВИЗНАЧИМО з (3.36):

$$c_{\text{grad, phot}} = 17 \times 10^{-6} \times (750 - 26,4) / (750 + 2 \times 26,4) = 15,3 \times 10^{-6} \text{ [Г} \times \text{Дж]}.$$

$g_{\text{CO}_2}$  можна визначити з виразу (3.37), в якому невідомою є лише провідність карбоксилювання  $g_{\text{хімічн}}$ , що описане в (3.38).

$$g_{\text{хімічн}} = -1,32 \times 10^{-5} \times 14^2 + 5,94 \times 10^{-4} \times 14 - 2,64 \times 10^{-3} = 3,1 \times 10^{-3} = 0,0031 \text{ [М} \times \text{с}^{-1}].$$

Тоді  $g_{\text{CO}_2} = 0,0015 \text{ [М} \times \text{с}^{-1}]$ .

Для розрахунку  $f_{\text{фотосинтез, max}}$  зручно спочатку знайти

$$c_{\text{grad, phot}} \times I_{\text{світло}} = 15,3 \times 10^{-6} \times 635 = 9,7 \times 10^{-3}$$

та

$$g_{\text{CO}_2} \times \rho_{\text{CO}_2} \times (\text{CO}_2 - \Gamma) = 0,0015 \times 1,83 \times 10^{-3} \times (750 - 26,4) = 2 \times 10^{-3},$$

а потім знайти

$$f_{\text{фотосинтез, max}} = (9,7 \times 2) \times 10^{-6} / (9,7 + 2) \times 10^{-3} = 1,66 \times 10^{-3} \text{ [Г} \times \text{М}^{-2} \times \text{с}^{-1}].$$

У підсумку знаходимо, що

$$f_{\text{фотосинтез}} = \{1 - \exp(-0,9 \times 0,075 \times 0,85 \times 2)\} \times 1,66 \times 10^{-3} = 1,8 \times 10^{-4} \text{ [Г} \times \text{М}^{-2} \times \text{с}^{-1}].$$

З урахуванням коефіцієнта  $c_\alpha = 0,68$  отримаємо, що збільшення сухої маси рослини за рахунок фотосинтезу дорівнює  $0,122 \times 10^{-3} \text{ [Г} \times \text{М}^{-2} \times \text{с}^{-1}\text{]}$ , що відповідає першому доданку моделі росту (3.42).

Розрахуємо складову дихання за формулою (3.34).

Відомими є такі величини:  $c_{\text{дихання, листя}} = 3,47 \times 10^{-7} \text{ [с}^{-1}\text{]}$ ;

$c_{\text{дихання, корінь}} = 1,16 \times 10^{-7} \text{ [с}^{-1}\text{]}$ ;  $c_T = 0,15$ ;  $c_{\text{дихання}} = 2$ .

Тоді

$$f_{\text{дихання}} = \{3,47 \times 10^{-7} + 0,15 \times (1,16 \times 10^{-7} - 3,47 \times 10^{-7})\} \times 2 \times 2^{(1,4 - 2,5)} = 3 \times 10^{-7} \text{ [Г} \times \text{М}^{-2} \times \text{с}^{-1}\text{]}.$$

Отже, в моделі росту (3.34) можна знехтувати зменшенням маси рослини в процесі видихання вуглецевого газу. В результаті похибка не перевищить

$$(3 \times 10^{-7} / 1,8 \times 10^{-4}) \times 100\% = 0,16\%.$$

Проведені оціночні розрахунки моделі росту (3.42) виявили, що збільшення маси рослини відбувається виключно за рахунок фотосинтезу. Втратою маси рослини за рахунок дихання можна знехтувати. При цьому похибка моделі росту для тепличних умов не перевищить 1 %, а модель набуде такого вигляду:

$$dX_{\text{загальна}}/dt = c_\alpha \times f_{\text{фотосинтез}}. \quad [\text{Г} \times \text{М}^{-2} \times \text{с}^{-1}] \quad (3.43)$$

З цієї моделі випливає, що збільшення маси рослини відбувається за рахунок процесу фотосинтезу, а вплив інших процесів незначний, що підтверджується біологічними дослідженнями.

## 4 ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПАРАМЕТРАМИ МІКРОКЛІМАТУ ТЕПЛИЧНОГО ГОСПОДАРСТВА

### 4.1 Обґрунтування імітаційної моделі системи керування

Моделювання системи керування параметрами мікроклімату повітря теплиці буде здійснено в середовищі MathLab Simulink. Оскільки вчені добре дослідили і оприлюднені результати моделювання стосуються головним чином системи керування обігрівом та зволоженням повітря теплиці, то керування такими параметрами як температура та вологість не буде метою дослідження цієї роботи. Найменш дослідженими параметрами мікроклімату тепличного господарства є керування концентрацією вуглецевого газу та освітленістю незважаючи на те, що саме споживання  $\text{CO}_2$  рослинами під час фотосинтезу є головним елементом їх росту. В деяких тепличних господарствах взагалі не враховується цей параметр і не застосовуються джерела вуглецевого газу, в інших – встановлюється стала концентрація  $\text{CO}_2$  незалежно від кількості хлоропластів на кожному з етапів зростання рослини. В прогресивних тепличних господарствах змінюють концентрацію вуглецевого газу в теплиці в часі за певним алгоритмом, але в цьому випадку процес розвитку певної тепличної культури повинен бути добре вивченим впродовж декількох років. При вирощуванні іншої культури або навіть її нового сорту треба виявляти новий алгоритм регулювання подачі  $\text{CO}_2$ , витрачаючи час та ресурси на його дослідження. Такий підхід пояснює підтримання сталої концентрації вуглецевого газу, який в не повній мірі витрачається саме на зростання рослин, а може потрапляти в повітря довкілля, збільшуючи кількість парникових газів у атмосфері.

В основу ідеї даної роботи покладено додавання у повітря теплиці саме такої кількості  $\text{CO}_2$ , скільки споживають рослини під час фотосинтезу. У додаток до вимірювання концентрації вуглецевого газу пропонується враховувати кількість хлоропластів відповідно до площі листів на один квадратний метр площі ґрунту

теплиці. Таким чином такий підхід дасть можливість зменшити витрати CO<sub>2</sub> та забруднення довкілля.

Іншим параметром, що рідко враховується серед параметрів мікроклімату є освітленість рослин, оскільки завдяки фотосинтетичному світловому випромінненню відбувається процес фотосинтезу, інтенсивність якого залежить, в тому числі, від кількості хлоропластів, а отже й від площі листів рослини. Для того, щоб інтенсивності світла вистачало для процесу фотосинтезу, його надають зі значним надлишком. На початкових стадіях росту тепличних культур процеси фотосинтезу відбуваються повільно через невелику кількість хлоропластів в невеликих листочках. Найчастіше в тепличних господарствах освітленість підтримують незмінною, вмикаючи світло ввечері і вимикаючи зранку. Вдень використовують фотоактивне випроміннення Сонця. Похмура погода вдень може призвести до нестачі сонячного випроміннення для фотосинтезу, а отже зменшити врожайність. Такий підхід призводить до надлишкового споживання електроенергії. Підвищити енергоефективність використання електроенергії можна за рахунок регулювання освітленості рослин теплиці, якої повинно вистачати лише для процесу фотосинтезу, але з урахуванням сонячного світла. Описані вище підходи до створення системи керування дадуть можливість підвищити ресурсозбережність тепличного господарства.

Отже, вихідними положеннями для побудови та дослідження ресурсозбережної системи керування мікрокліматом теплиці є керування подачею вуглецевого газу залежно від площі листа рослини та підтримання оптимуму між параметрами освітленості та концентрацією CO<sub>2</sub>. Будемо вважати, що кількості води є достатньо для процесу фотосинтезу та розвитку рослин.

#### **4.2 Модель системи керування концентрацією вуглецевого газу**

Для створення та дослідження моделі системи керування вуглецевим газом залежно від температури та площі листа салату візьмемо математичну модель балансу

CO<sub>2</sub> (3.23), знехтувавши концентрацією вуглецевого, що видихає рослина. Це призводить до виникнення відносної похибки меншої за 1%, що доведено в п. 3.3.6. Також для подальшого спрощення моделі балансу CO<sub>2</sub> можна поставити умову, що втрати вуглецевого газу в результаті вентиляції враховувати не будемо. Така умова є справедливою для зимових теплиць, коли при низькій температурі ззовні теплиці вентиляція може загубити врожай. Якщо вентиляція відбувається за графіком, то втрату CO<sub>2</sub> можна врахувати в компоненті джерела. Після таких спрощень рівняння балансу вуглецевого газу набуде вигляду:

$$dCO_2/dt = 1/c_{\text{сар,CO}_2} \times [-\varphi_{\text{фотосинтез}} + \varphi_{\text{джерело}}]. \quad [\Gamma \times \text{м}^{-3} \times \text{с}^{-1}] \quad (4.1)$$

Звідси запишемо рівняння, що описує продуктивність джерела CO<sub>2</sub> по відношенню до одиниці площі теплиці:

$$\varphi_{\text{джерело}} = c_{\text{сар,CO}_2} \times (dCO_2/dt) + \varphi_{\text{фотосинтез}}. \quad [\Gamma \times \text{м}^{-2} \times \text{с}^{-1}] \quad (4.2)$$

З рівняння (4.2) видно, що джерело вуглецевого газу повинно покривати витрати CO<sub>2</sub> на процес фотосинтезу рослин ( $\varphi_{\text{фотосинтез}}$ ) та на зміну концентрації вуглецевого газу в тепличному повітрі ( $c_{\text{сар,CO}_2} \times dCO_2/dt$ ).

Процес фотосинтезу можна описати виразом (3.25), в результаті чого рівняння, що описує споживання рослинами вуглецевого газу, набуде вигляду:

$$\varphi_{\text{джерело}} = f_1(X_{\text{dry}}) \times f_2(I) \times f_3(T) \times f_4(\text{CO}_2) / \{f_2(I) + f_3(T) \times f_4(\text{CO}_2)\}, \quad [\Gamma \times \text{м}^{-2} \times \text{с}^{-1}] \quad (4.3)$$

де  $f_1(X_{\text{dry}}) = \{1 - \exp(-c_{\text{pl,d}} \times X_{\text{dry}})\}$  описує фотосинтетичні властивості рослини;

$f_2(I) = c_{\text{рад, phot}} \times I_{\text{світло}} = c_{\text{рад, phot}} \times (I_{\text{сонця}} + I_{\text{лампа}})$  визначає потужність світлового випромінювання;



$f_3(T) = (-c_{CO_2, 1} \times T^2 + c_{CO_2, 2} \times T - c_{CO_2, 3})$  відображає вплив температури на процес фотосинтезу;

$$f_4(CO_2) = (CO_2 - c_T).$$

Враховуючи формулу (3.39), функція  $f_1(X_{dry})$  може бути записана у вигляді:

$$f_1(X_{dry}) = 1 - \exp\{ -c_{pl,d} / ((1 - c_T) \times k_{листя}) \times S_{листя} \}, \quad (4.4)$$

Отже, для керування концентрацією вуглецевого газу вхідними параметрами є такі:

- відносна площа листа ( $S_{leaf}$ ), [ $m^2$  (листя) /  $m^2$  (ґрунту)];
- температура повітря в теплиці (temperature), [ $^{\circ}C$ ].
- потужність випромінення Сонця на  $1 m^2$  (Sun light), [Ватт /  $m^2$ ];
- концентрація вуглецевого газу ( $CO_2$ ), [ppm].

Вихідними параметрами є такі:

- витрата вуглецевого газу  $Q$ , [ $m^3 / c$ ];
- потужність випромінення лампи на  $1 m^2$  ( $P_{lamp}$ ), [Ватт /  $m^2$ ].

Витрату вуглецевого газу на одиницю площі теплиці визначали на підставі виразу (4.3) спочатку реалізувавши функції  $f_1 - f_4$  (рис. 4.1 – 4.4).

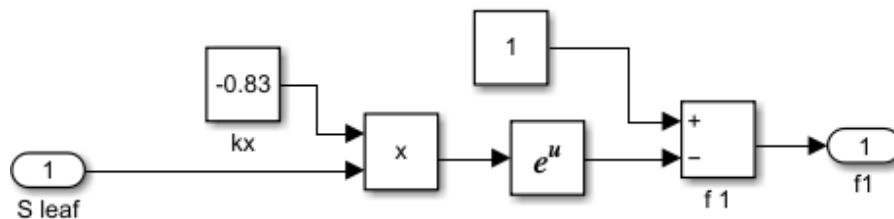


Рисунок 4.1 – Підсистема Simulink визначення функції  $f_1$ , що враховує площу листа рослини ( $S_{leaf}$ )

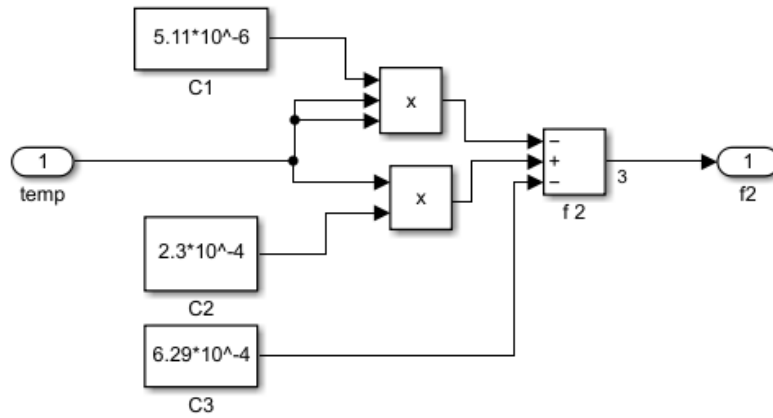


Рисунок 4.2 – Підсистема Simulink визначення функції  $f_2$ , що враховує вплив температури (temp)

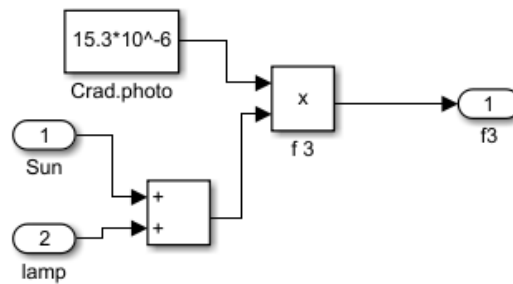


Рисунок 4.3 – Підсистема Simulink визначення функції  $f_3$ , що враховує потужність сонячного випромінення (Sun) та лампи (lamp)

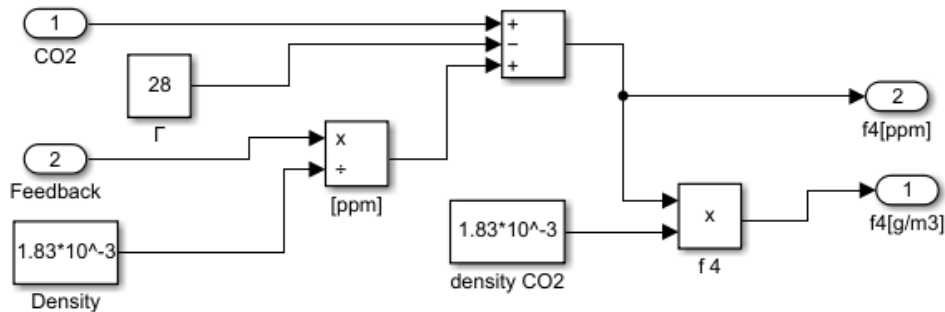


Рисунок 4.4 – Підсистема Simulink визначення функції  $f_4$ , що враховує концентрацію  $\text{CO}_2$

У підсумку була визначена масова витрата вуглецю на одиницю площі теплиці (рис. 4.5)

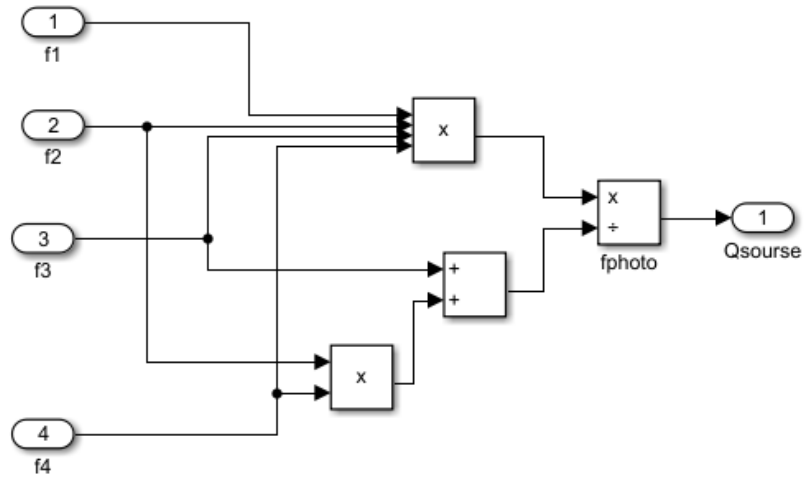


Рисунок 4.5 – Підсистема Simulink визначення витрати вуглецевого газу на одиницю площі теплиці,  $[г / (с \times м^2)]$  у процесі фотосинтезу

Для подальшого вибору виконавчих механізмів був зроблений перехід від масової витрати  $Q_m$   $[г / с]$  до об'ємної  $Q_v$   $[м^3 / с]$  (рис. 4.6) за формулою, наведеною в [25]:

$$Q_v = Q_m / \rho, \quad (4.5)$$

де  $\rho$  – густина вуглецевого газу.  $\rho = 1,83 \times 10^{-3} [г / м^3]$ .

Надалі були визначені витрати вуглецевого газу на усю теплицю площею  $100 м^2$  та з урахуванням формули (4.6) були вибрані передавальні функції двигуна (motor) і заслонки (damper).

$$Q_{o\ddot{o}} = bS_0 \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot \Delta P}{\rho}}. \quad (4.6)$$

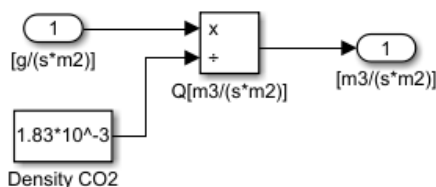


Рисунок 4.6 – Підсистема Simulink, що реалізує формулу (4.5)

Для визначення концентрації вуглецевого газу в повітрі теплиці з урахуванням його витрати додамо підсистему  $CO_2 = k \cdot Q$  та виберемо сумісний з Arduino та Raspberry PI давач MQ-135, діапазон вимірювання якого можна регулювати під час калібрування. З довідкових даних [26, 27] визначаємо параметри передатної функції давача концентрації вуглецевого газу MQ-135. З таблиці [26] вибираємо, що  $k = 0.6$ , а згідно з [27]  $T = 30$  с. Давач  $CO_2$  розташовуємо у ланцюгу зворотного зв'язку.

Для перевірки адекватності системи керування постачанням вуглекислого газу промодельюємо її. Прийmemo температуру незмінною, оптимальне значення якої при вирощуванні салату становить  $14$  °C. Здійснимо моніторинг зміни витрат та концентрації  $CO_2$  залежно від розмірів листя салату. Будемо вважати, що вуглецевий газ не витрачається, якщо рослини немає (площа листа дорівнює нулю) і його концентрація буде незмінною (рис. 4.7).

З моделі рисунка 4.7 видно, що при відсутності листів салату ( $S_{leaf} = 0$ ) вуглецевий газ не витрачається (0 на Display Q). Концентрація  $CO_2$  також залишається незмінною (на Display  $CO_2$  виводиться значення  $772 + 28 = 800$  ppm).

При збільшенні розмірів листя до 50 % на одиницю площі ґрунту (рис. 4.8) витрати  $CO_2$  становлять  $5,647$  м<sup>3</sup>/с, а його концентрація збільшується на 42 ppm.

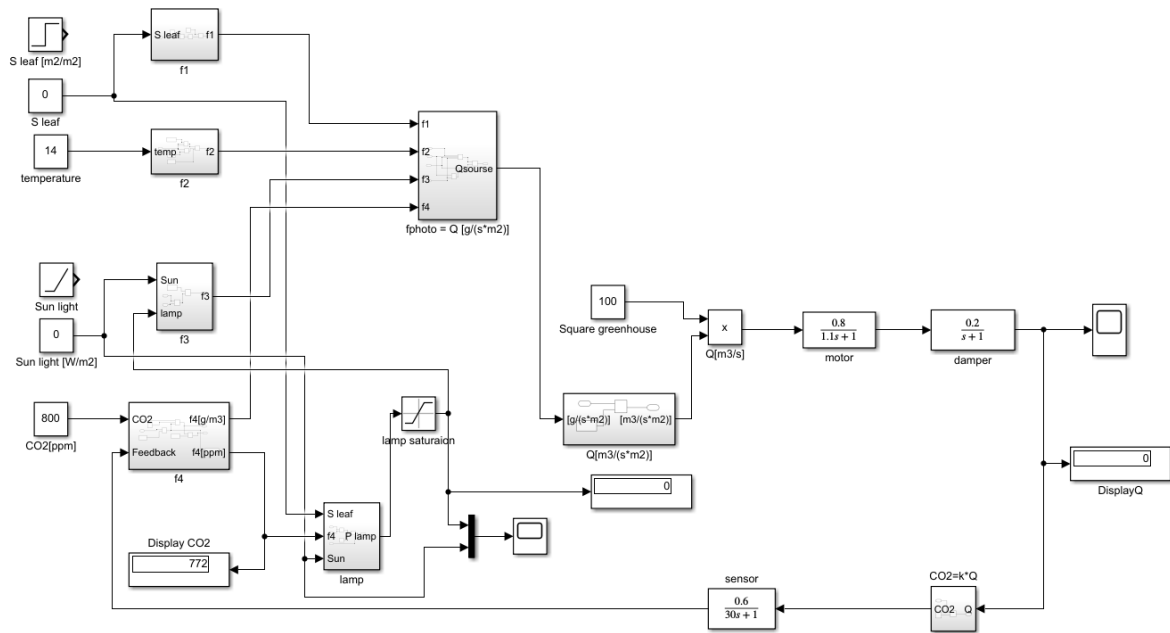


Рисунок 4.7 – Перевірка адекватності моделі у Matlab Simulink при площі листа, що дорівнює 0 [м<sup>2</sup> листа / м<sup>2</sup> ґрунту]

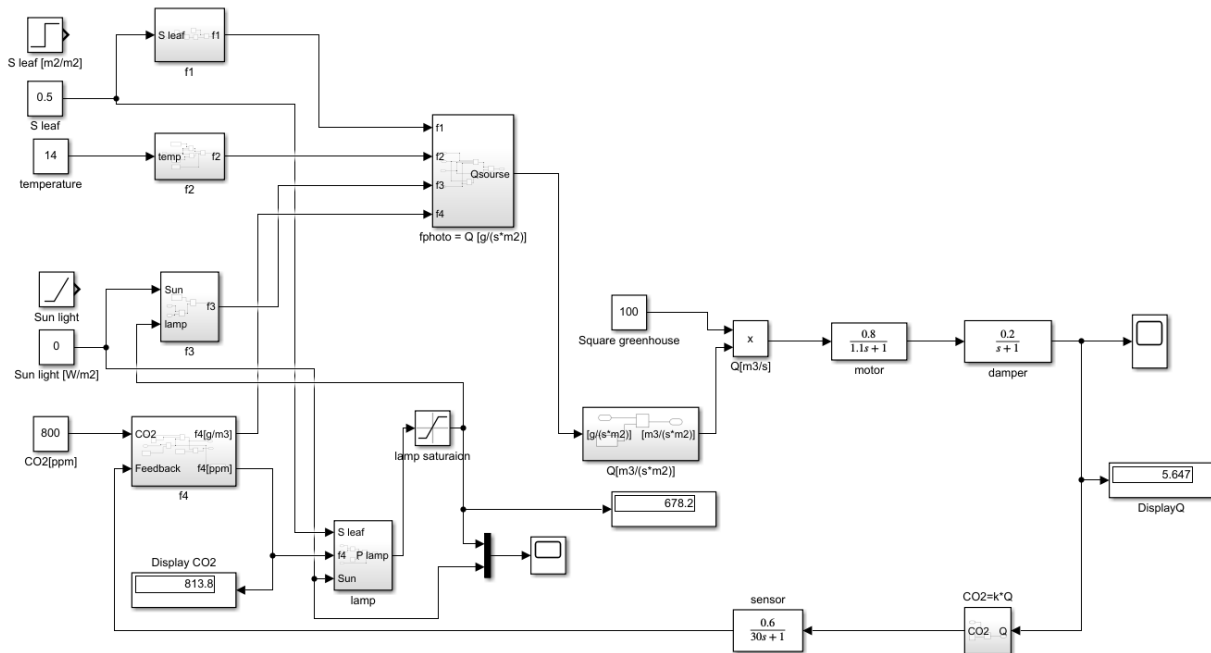


Рисунок 4.8 – Перевірка адекватності моделі у Matlab Simulink при площі листа, що дорівнює 0,5 [м<sup>2</sup> листа / м<sup>2</sup> ґрунту]

Для граничного значення  $S_{\text{leaf}} = 1$  [м<sup>2</sup> листа / м<sup>2</sup> ґрунту] (рис. 4.9) витрата вуглецевого газу збільшилася до 10,68 м<sup>3</sup>/с, а його концентрація збільшується на  $850 - 772 = 78$  ppm і досягає значення у 878 ppm порівняно з вихідною концентрацією у 800 ppm.

Головними вимогами до якості керування концентрацією вуглецевого газу в теплиці є заборона перерегулювання, оскільки перевищення концентрації CO<sub>2</sub> в теплиці значення 1200 ppm негативно впливає на розвиток культур та навіть може їх знищити. З іншого боку жорсткі вимоги до тривалості перехідного процесу регулювання CO<sub>2</sub> не ставляться через низьку швидкість росту рослини (збільшення площі листів).

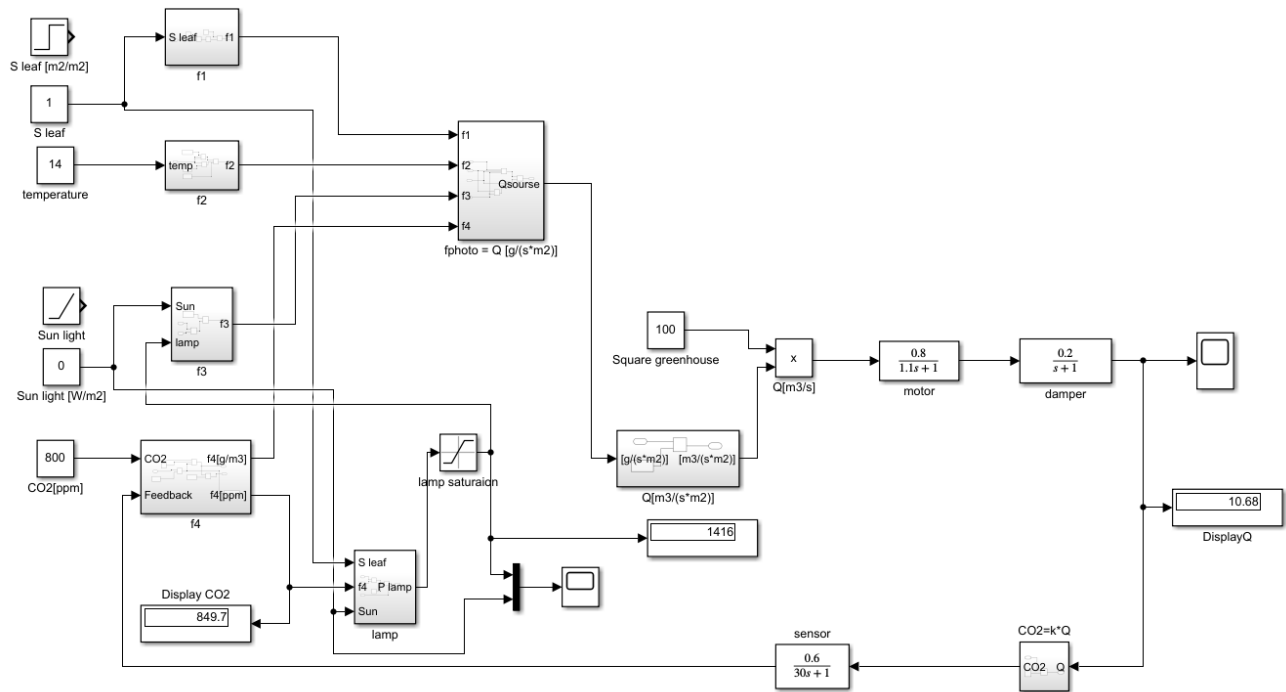


Рисунок 4.9 – Перевірка адекватності моделі у Matlab Simulink при площі листа, що дорівнює 1 [м<sup>2</sup> листа / м<sup>2</sup> ґрунту]

Для визначення динамічних характеристик об'єкта побудуємо розгонну криву в Simulink. Подамо одиничний ступінчастий пробний сигнал на вхід, що відповідає за збільшення площі листа тепличної культури. Графік розгонної кривої наведено на рисунку 4.10.

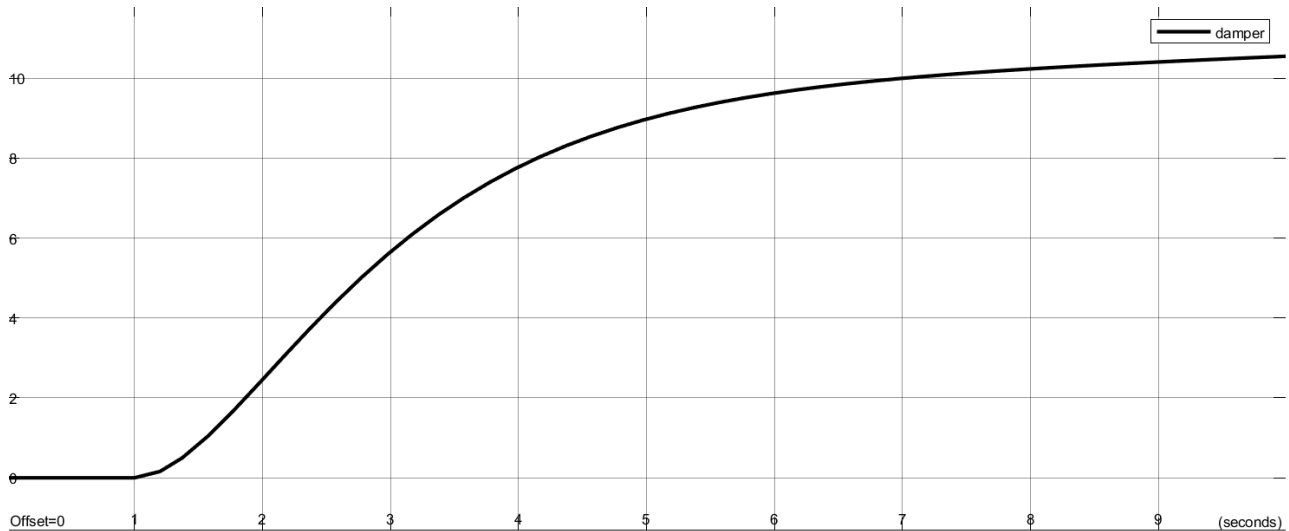


Рисунок 4.10 – Розгінна характеристика керування витратами вуглецевого газу

Як видно з графіка 4.10, розгонна характеристика відповідає аперіодичній ланці другого порядку. Оскільки коливання на графіку відсутні, то і перерегулювання відсутнє, що є однією з вимог до системи керування. Для визначення динамічних характеристик об'єкта скористуємося методом дотичної у точці перегину (рис. 4.11).

З графіку 4.11 видно, що коефіцієнт динамічного підсилення  $k = 10,5$ , час запізнювання  $\tau = 1,3$  с, стала часу (час розігнання) об'єкта  $T = 3,0$  с. Для об'єкта, яким є теплиця, такі динамічні характеристики повністю задовольняють вимогам до регулювання витратами вуглецевого газу.

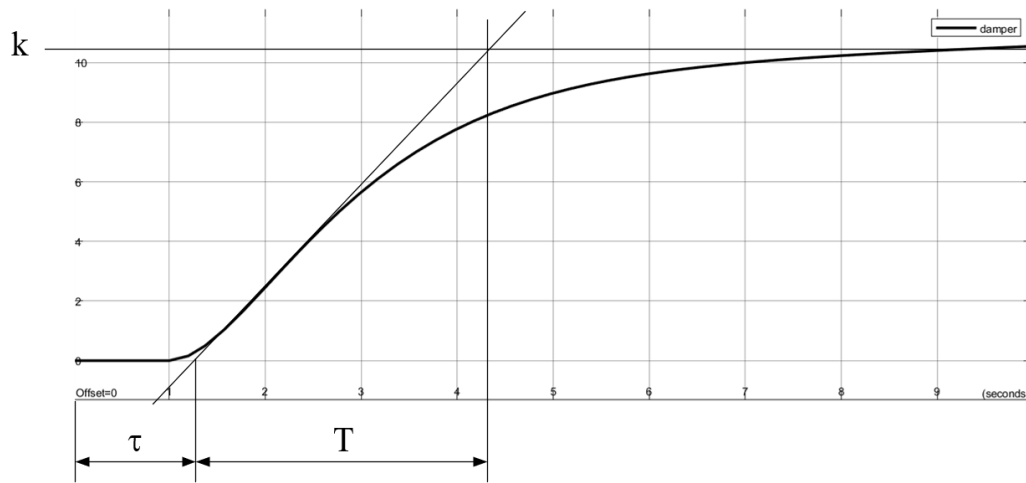


Рисунок 4.11 – Графічне визначення динамічних характеристик об’єкта методом дотичної

### 4.3 Модель системи керування освітленням теплиці

Ресурсозбережність система керування освітленістю полягає в регулюванні освітленістю теплиці, якої повинно вистачати лише для процесу фотосинтезу, але з урахуванням сонячного світла. Описати керування потужністю випромінення лампи можна за допомогою виразу (3.34), який являє собою баланс між концентрацією вуглецевого газу ( $\text{CO}_2$ ) та потужністю світла ( $I_{\text{світло}}$ ), необхідного для максимально повного фотосинтезу. Знайдемо зв’язок між ними, поділивши чисельник і знаменник на множник  $c_{\text{rad, phot}} \times I_{\text{світло}}$ :

$$f_{\text{фотосинтез, max}} = g_{\text{CO}_2} \times \rho_{\text{CO}_2} \times (\text{CO}_2 - \Gamma) / \{1 + g_{\text{CO}_2} \times \rho_{\text{CO}_2} \times (\text{CO}_2 - \Gamma) / (c_{\text{rad, phot}} \times I_{\text{світло}})\}, \quad (4.7)$$

З цього виразу можна отримати зв’язок між концентрацією вуглецевого газу ( $\text{CO}_2$ ) та потужністю світла ( $I_{\text{світло}}$ ), що беруть участь у процесі фотосинтезу. Проблемою для виявлення такого зв’язку є відсутність даних про максимальну



швидкість фотосинтезу. Для її вирішення реалізуємо вираз (4.7) та здійснимо моделювання в Simulink.

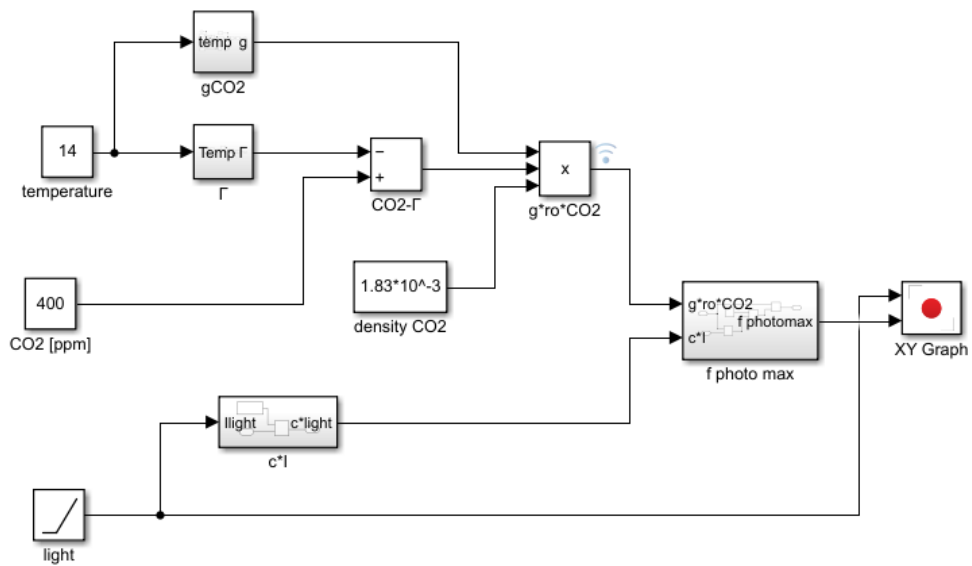


Рисунок 4.12 – Модель у Matlab Simulink, що реалізує вираз (4.7)

Підсистеми, використані в цій моделі, наведені на рисунках 4.13 – 4.17.

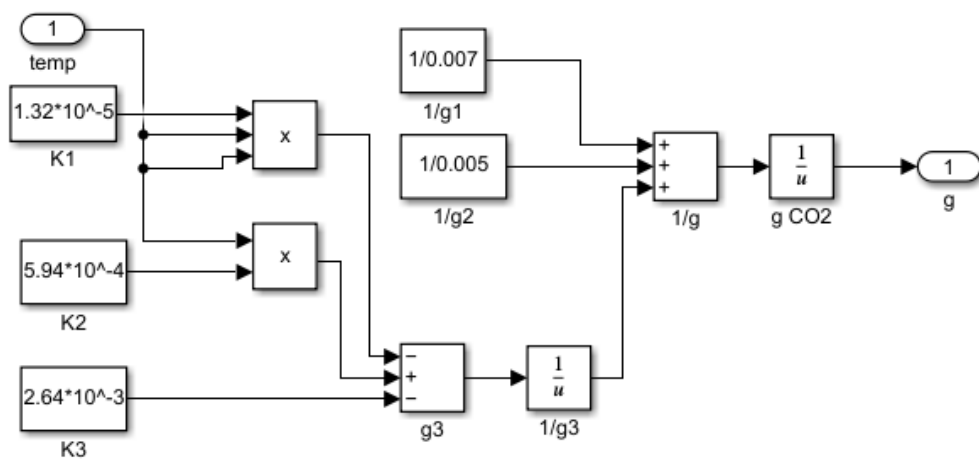


Рисунок 4.13 – Підсистема Simulink, що реалізує формули (3.37), (3.38)

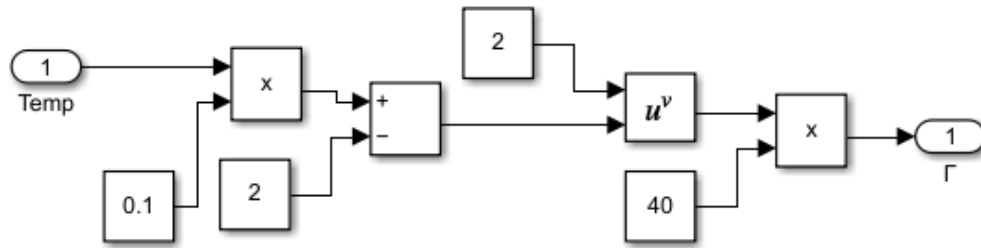


Рисунок 4.14 – Підсистема Simulink, що реалізує формулу (3.35)

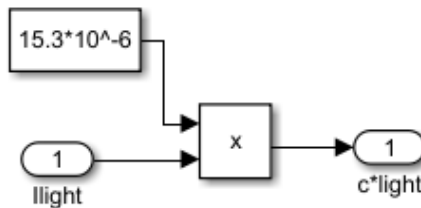


Рисунок 4.15 – Підсистема Simulink, що реалізує вираз  $c_{rad, phot} \times I_{світло}$

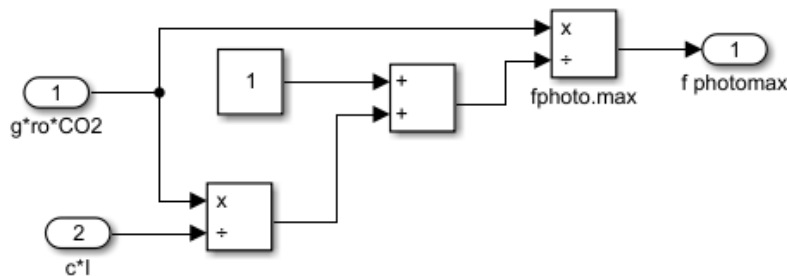


Рисунок 4.16 – Підсистема Simulink, що реалізує формулу (4.7)

Під час моделювання визначалася залежність швидкості фотосинтезу від потужності світлового випромінення при різних значеннях концентрації вуглецевого газу (рис. 4.17, 4.18, 4.19).

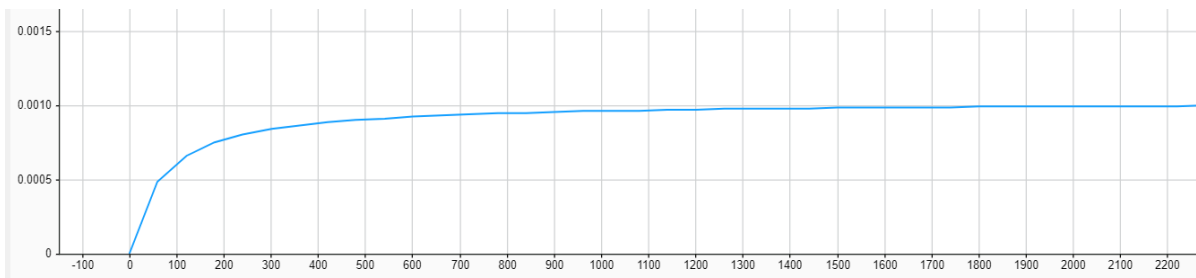


Рисунок 4.17 – Графік залежності швидкості фотосинтезу від освітленості при концентрації CO<sub>2</sub>, що становить 400 ppm

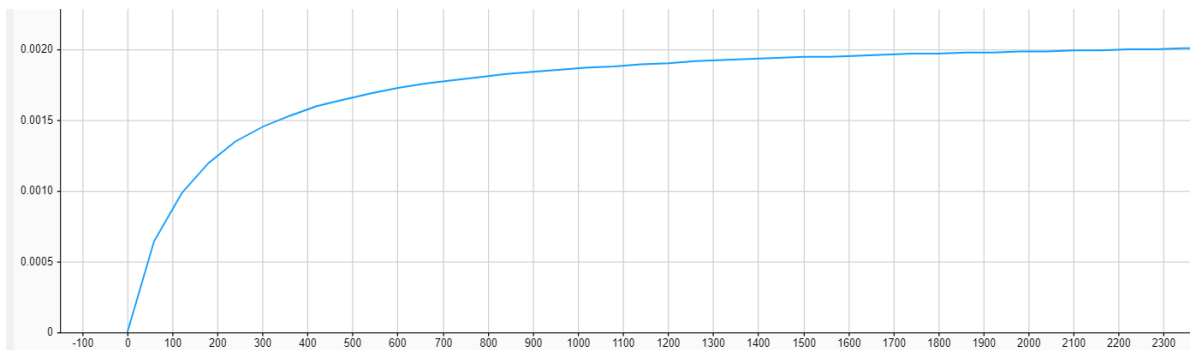


Рисунок 4.18 – Графік залежності швидкості фотосинтезу від освітленості при концентрації CO<sub>2</sub>, що становить 800 ppm

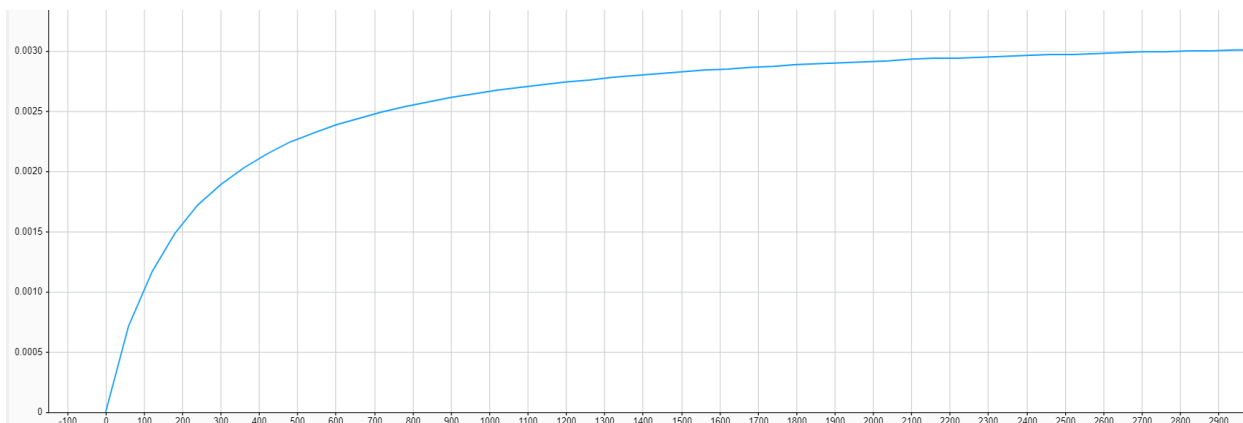


Рисунок 4.19 – Графік залежності швидкості фотосинтезу від освітленості при концентрації CO<sub>2</sub>, що становить 1200 ppm

Моделювання здійснювалося для значень концентрації вуглецевого газу, що змінювалася від 400 ppm до 1200 ppm з кроком у 200 ppm. Для кожного випадку виявлялося значення потужності світла, при якому відбувалося насичення, що вказувало на недоцільність збільшення потужності, оскільки воно майже не впливало на швидкість фотосинтезу. Результати досліджень наведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Результати моделювання у Matlab Simulink

Концентрація CO <sub>2</sub> , [ppm]	400	600	800	1000	1200
Потужність світла, [Ватт / м <sup>2</sup> ]	700	1000	1400	1700	2100
Співвідношення	0,57	0,6	0,57	0,59	0,57

З таблиці 4.1 видно, співвідношення концентрації вуглецевого газу до потужності світла, що бере участь в процесі фотосинтезу, знаходиться в межах від 0,57 до 0,6. Отже, регулювати потужність світла на одиницю площі теплиці можна відповідно до концентрації CO<sub>2</sub> з урахуванням коефіцієнта 0,6.

На рисунках 4.7 – 4.9 використана підсистема lamp, що з урахуванням концентрації вуглецевого газу (функція  $f_4$ ), площі листа ( $S_{leaf}$ ) та потужності сонячного випромінення (Sun) керує потужністю лампи lamp.

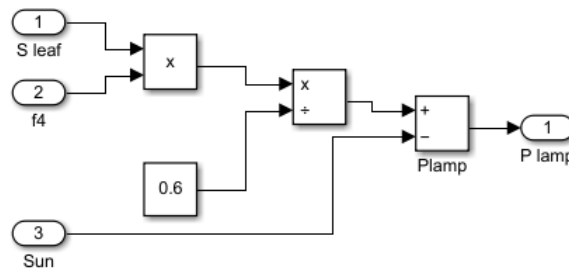


Рисунок 4.16 – Підсистема Simulink, що відповідає за керування потужністю лампи

Коефіцієнт зворотного зв'язку  $k$  в підсистемі  $CO_2 = k * Q$  був підібран в результаті моделювання при умові, щоб потужність освітлення відповідала даним, наведеним в табл. 4.1. При концентрації вуглецевого газу у 800 ppm потужність становила 1416 Ватт / м<sup>2</sup> (див. рис. 4.9), що на 16 Ватт / м<sup>2</sup> вища за табличну. Схема підсистеми  $CO_2 = k * Q$  наведена на рисунку 4.17.

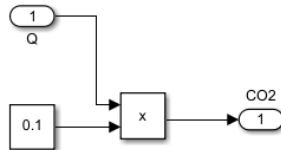


Рисунок 4.17 – Підсистема  $CO_2 = k * Q$  у Matlab Simulink

Блок «lamp saturation» використаний, щоб врахувати відключення лампи, якщо сонячного випромінювання достатньо або забагато для процесу фотосинтезу.

Для перевірки адекватності моделі керування освітленістю у теплиці змінювали потужність випромінювання Сонця у виводили у вигляді графіків (рис. 4.18) зміну потужності Сонця (пунктирна лінія) та лампи (суцільна лінія).

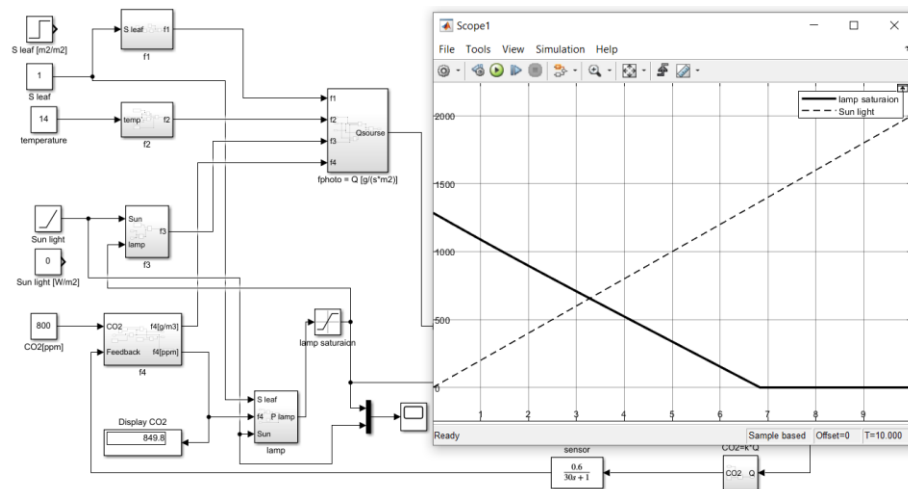


Рисунок 4.18 – Моделювання системою керування освітленістю в теплиці

З рисунку 4.18 видно, що при досягненні потужності сонячного випромінення у  $1416 \text{ Вт / м}^2$  лампа вимикається (горизонтальна лінія).

#### **4.4 Вибір обладнання та SCADA система моніторингу параметрів мікроклімату теплиці**

Оскільки в роботі досліджувалася система керування автоматизованої теплиці, то функцією людини є лише моніторинг параметрів мікроклімату. Для аналізу роботи такої системи розглянемо обладнання системи керування та алгоритм її роботи.

У теплиці за допомогою давача температури вимірюється температура повітря. Для цього можна використати сумісні з Arduino та Raspberry PI давач температури типу DS18B20 або давачі температури та вологості DHT11, DHT22. Для вимірювання концентрації вуглецевого газу вибраний давач MQ-135. Визначити площу листів салату можна за допомогою давача відтінків кольору TCS230, який може розрізняти червоний, синій та зелений кольори; кожному кольору відповідає власна частота сигналу. Для такої мети можна також використати ультразвукові давачі відстані HC-SR04 тощо. Четвертим параметром, значення якого необхідно для керування параметрами є освітленість. Існує великий вибір давачів освітленості (KY-018, TEMT6000, TZT, GY-302 тощо) сумісних з Arduino та Raspberry PI, в яких за первинний перетворювач використовується фотодіод або фоторезистор. За керувальний пристрій пропонується вибрати одноплатний комп'ютер Raspberry PI або мікропроцесор AVR на платформі Arduino – це залежить від вимог до системи керування та цінової політики. Виконавчим механізмом керування постачанням вуглецевого газу може бути серводвигун із заслінкою, двигун постійного струму тощо з енкодером (давачем кута обертання). Регулювати освітлення у теплиці можна за рахунок подавання ШІМ-сигналу на світлодіодні лампи або стрічки з використанням драйверів за необхідністю. Схема підключень наведена на рисунку 4.19.

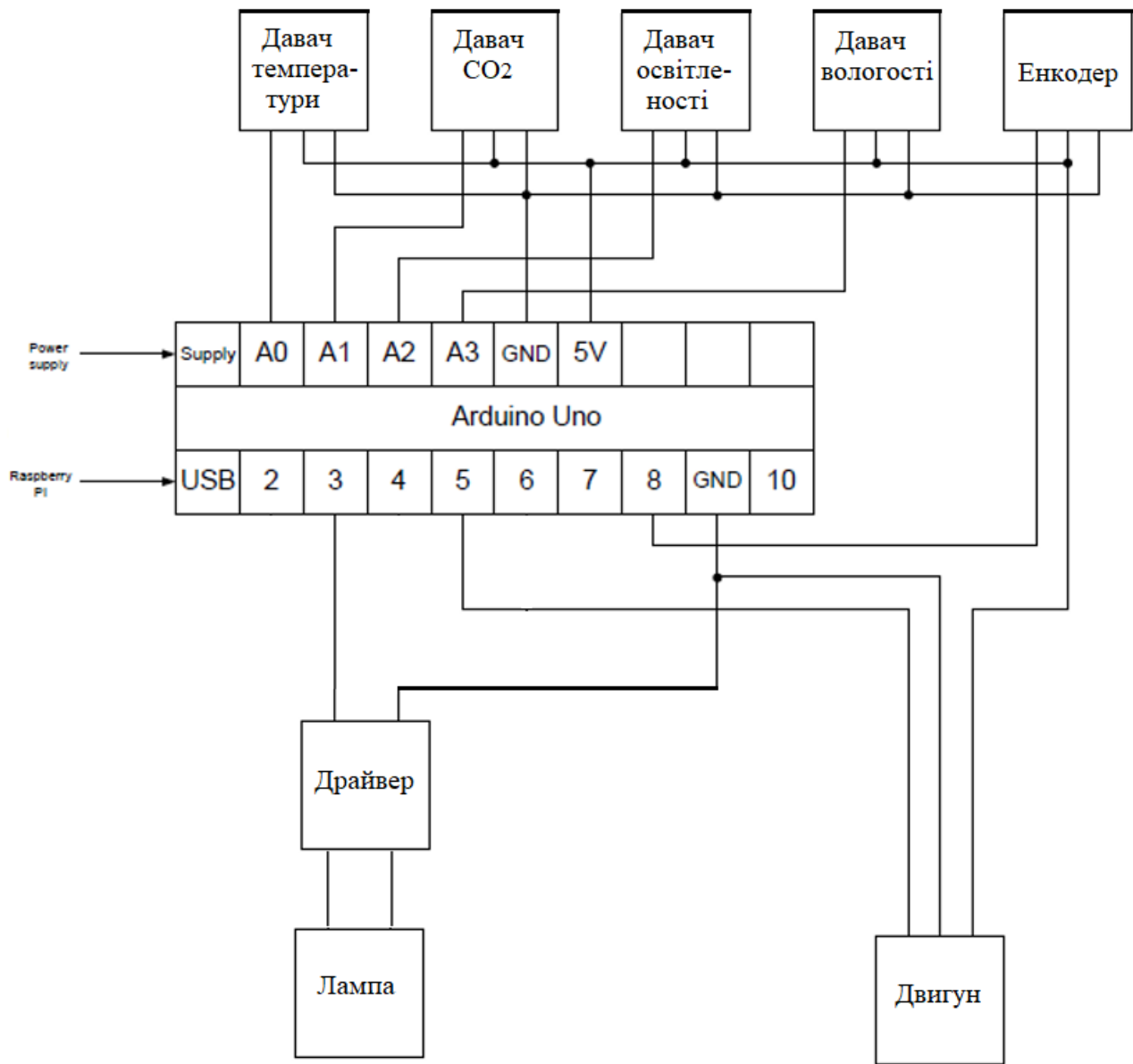


Рисунок 4.19 – Схема підключень датчиків та виконавчих механізмів системи керування концентрацією вуглецевого газу та освітленістю теплиці

Сумісно з Arduino передбачено використовувати комп'ютер або Raspberry PI, з'єднавши їх між собою через послідовний інтерфейс SPI (виводи 10, 11, 12, 13 у Arduino Uno) за протоколом ModBus. Комп'ютер або Raspberry PI може бути

використаний для створення SCADA та передачі даних через комп'ютерну мережу мобільному користувачеві.

У іншому випадку можна давачі та виконавчі механізми через колодку GPIO під'єднати до одноплатного комп'ютера Raspberry PI.

Після реалізації системи керування мікрокліматом тепличного господарства на платформі Arduino Uno на основі математичної та імітаційної моделей та за схемою підключень (рис. 4.19) була розроблена SCADA система для моніторингу таких параметрів:

- відносної площі листа;
- концентрації вуглецевого газу;
- витрати вуглецевого газу;
- температури тепличного повітря;
- вологості повітря;
- потужності сонячного випромінення;
- потужності лампи освітлення.

В процесі дослідження SCADA вибирали незмінними температуру ( $T = 14\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), відносну вологість ( $H = 60\%$ ) повітря та потужність сонячного випромінення ( $P_{\text{Сонця}} = 200\text{ Вт/м}^2$ ), а змінювали лише відносну площу листа рослин. На рисунку 4.20 наведена панель SCADA під час відсутності рослини, що відповідає нульовому значенню відносної площі листа. З рисунка видно, що вуглецевий газ не потрапляє до теплиці (витрата  $\text{CO}_2$  дорівнює нулю), а його концентрація є сталою, що відповідає заданому значенню; лампа освітлення теплиці вимкнена.

При рості рослини збільшується відносна площа її листів, що вимагає підвищення витрат вуглецевого газу на процес фотосинтезу. На SCADA, наведеній на рисунку 4.21 видно, що при площі листа рослини, що на половину вкриває ґрунт, збільшилися концентрація та витрати вуглецевого газу, а також увімкнулася штучне освітлення



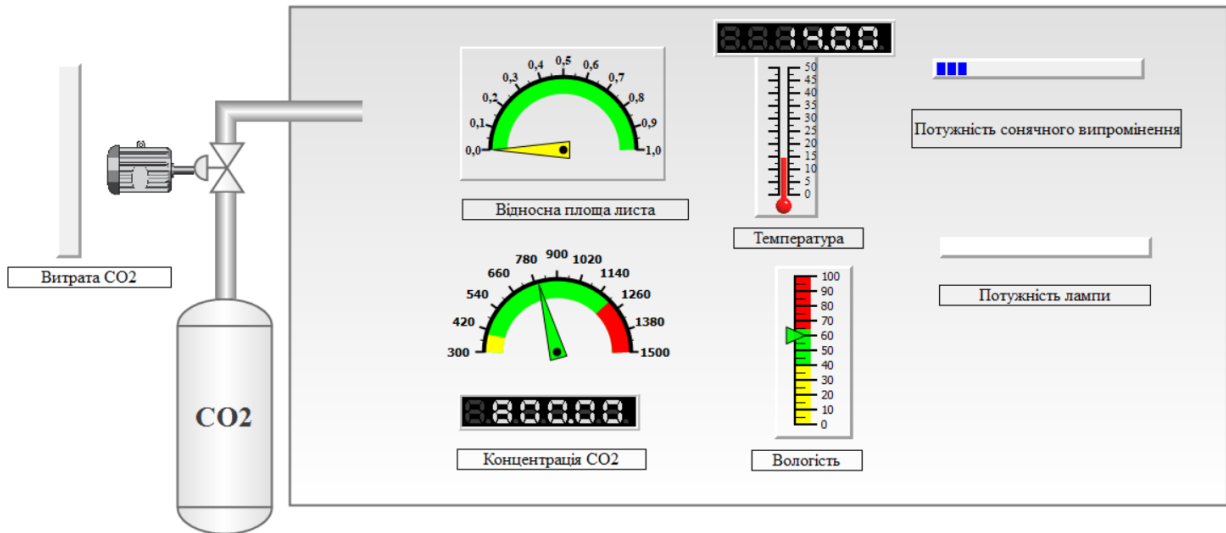


Рисунок 4.20 – Панель SCADA при відсутності рослини в теплиці

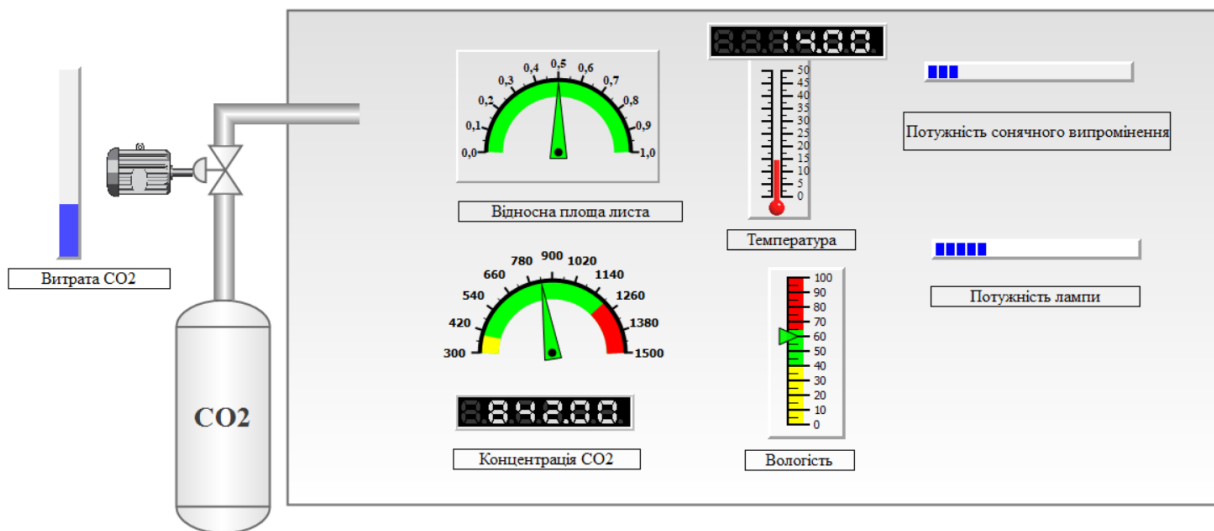


Рисунок 4.21 – Панель SCADA при відносній площі рослини, що відповідає половині площі ґрунту

Подальший ріст тепличної культури до повного покриття ґрунту листями (рис. 4.22) спричиняє збільшення витрати й концентрації вуглецевого газу та потужності випромінювання штучного освітлення.

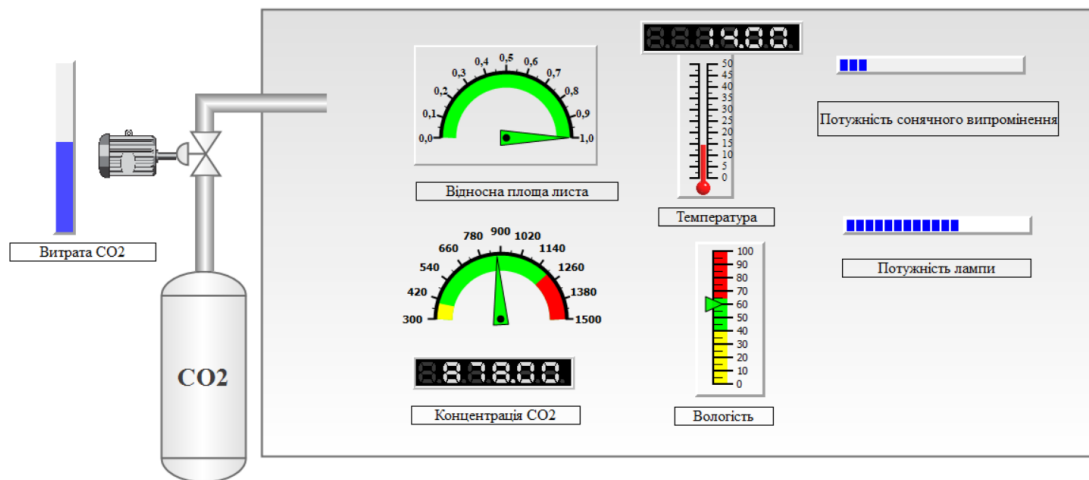


Рисунок 4.22 – Панель SCADA у випадку повного покриття ґрунту листями рослини

На рисунку 4.23 наведена реакція системи керування на зміну потужності сонячного випромінювання, де видно, що потужність лампи системи штучного освітлення теплиці зменшилася.

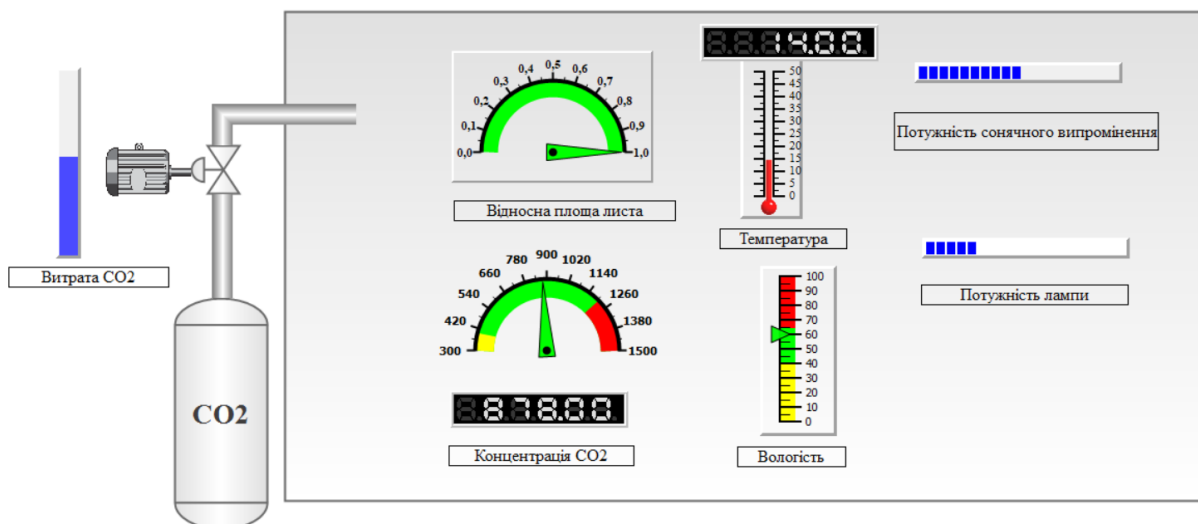


Рисунок 4.23 – Панель SCADA у випадку зміни потужності сонячного випромінювання

## ВИСНОВКИ

1 Проаналізований ринок тепличних господарств, що має тенденцію сталого зростання на 10% щорічно. Розглянені переваги автоматизації теплиць та виявлені процеси, що піддають автоматизації, такі як опалення, охолодження, освітлення, поливу, запилення рослин, збору врожаю. Описані контури системи керування параметрами мікроклімату тепличного господарства та наведена калькуляція витрат на її створення.

2 Проаналізований вплив вуглецевого газу на процеси росту врожаю. Розглянено обладнання для генерування вуглецевого газу. На якісному рівні досліджений зв'язок концентрації вуглецевого газу з іншими параметрами мікроклімату теплиці.

3 В результаті аналізу моделей енергетичного балансу, балансу водяної пари та балансу вуглецевого газу була удосконалена та адаптована під вирощування салату в теплиці мікрокліматична математична модель з урахуванням погодної моделі довкілля. Оціночні розрахунки параметрів математичної моделі росту рослин виявили можливість її спрощення.

4 В результаті імітаційного моделювання в середовищі Matlab Simulink здійснена перевірка на адекватність математичних моделей, скорегована модель системи керування та досліджена якість керування такими параметрами мікроклімату як концентрація вуглецевого газу та освітленість теплиці.

5 Запропонована реалізація системи керування параметрами мікроклімату тепличного господарства та їх моніторинг за допомогою SCADA системи.

6 Результати роботи були оприлюднені під час науково-технічної конференції [28].

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Smart greenhouse market / URL: <https://www.emergenresearch.com/industry-report/smart-greenhouse-market> (дата звернення: 28.12.2022).
2. Smart Greenhouse Market / URL: <https://www.alliedmarketresearch.com/smart-greenhouse-market> (дата звернення: 28.12.2022).
3. Automated greenhouse / URL: <https://autogrow.com/your-growing-environment/automated-greenhouse> (дата звернення: 28.12.2022).
4. Greenhouse Automation Systems for successful growing / URL: <https://www.climatecontrol.com/blog/automated-greenhouse-systems/> (дата звернення: 28.12.2022).
5. 5 benefits of automating a commercial greenhouse / URL: <https://www.climatecontrol.com/blog/5-benefits-of-automating-a-commercial-greenhouse/> (дата звернення: 28.12.2022).
6. Methods of Exposing Plants to Elevated Carbon Dioxide / URL: [https://www.ars.usda.gov/ARSUserFiles/60100500/csr/ResearchPubs/rogers/rogers\\_85a.pdf](https://www.ars.usda.gov/ARSUserFiles/60100500/csr/ResearchPubs/rogers/rogers_85a.pdf) (дата звернення: 28.12.2022).
7. Peng Chen, Gaotian Zhu, Hye-Ji Kim, Paul B. Brown, Jen-Yi Huang, Comparative life cycle assessment of aquaponics and hydroponics in the Midwestern United States, Journal of Cleaner Production, Volume 275, 2020, 122888, ISSN 0959-6526.  
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652620329334> (дата звернення: 28.12.2022).
8. Automated Greenhouse / URL: <https://www.instructables.com/Automated-Greenhouse/> (дата звернення: 28.12.2022).
9. Greenhouse Carbon Dioxide Supplementation / URL: <https://extension.okstate.edu/fact-sheets/greenhouse-carbon-dioxide-supplementation.html> (дата звернення: 28.12.2022).

10. CO<sub>2</sub> and crops: NAS vs. Science / URL: <https://wattsupwiththat.com/2019/01/21/co2-and-crops-nas-vs-science/> (дата звернення: 28.12.2022).

11. Remote Control of Greenhouse Vegetable Production with Artificial Intelligence—Greenhouse Climate, Irrigation, and Crop Production [Silke Hemming](#), [Feije de Zwart](#), [Anne Elings](#) et. Sensors 2019, 19(8), 1807.

URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/19/8/1807/htm> (дата звернення: 28.12.2022).

12. Effects of Rising Atmospheric Concentrations of Carbon Dioxide on Plants / URL: <https://www.nature.com/scitable/knowledge/library/effects-of-rising-atmospheric-concentrations-of-carbon-13254108/> (дата звернення: 28.12.2022).

13. Center Experiment #3: Final Results / URL: [http://www.co2science.org/education/experiments/center\\_exp/experiment3/exp3\\_final.php](http://www.co2science.org/education/experiments/center_exp/experiment3/exp3_final.php) (дата звернення: 28.12.2022).

14. How Do Increased Carbon Dioxide Levels Affect Plant Growth? / URL: <https://csef.usc.edu › History › Projects › J2321> (дата звернення: 28.12.2022).

15. Johnson CO<sub>2</sub> Generator / URL: <https://www.greenhousemegastore.com/collections/co2-generators/products/johnson-co2-generator?variant=42701237289159> (дата звернення: 28.12.2022).

16. Using CO<sub>2</sub> Generator w. Marijuana / URL: [https://greencultured.co/using-co2-generator-w-marijuana-grow-rooms/?utm\\_referrer=https%3A%2F%2Fwww.google.com%2F](https://greencultured.co/using-co2-generator-w-marijuana-grow-rooms/?utm_referrer=https%3A%2F%2Fwww.google.com%2F) (дата звернення: 28.12.2022).

17. Process-based greenhouse climate models: Genealogy, current status, and future directions David Katzin, Eldert J. van Henten et al. Agricultural Systems, 198, 4 2022.

URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308521X22000245> (дата звернення: 28.12.2022).

18. Towards user accepted optimal control of greenhouse climate G. van Straten, H. Challa, F. Buwalda, Computers and Electronics in Agriculture 26 (2000) 221–238.

URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168169900000776>

(дата звернення: 28.12.2022).

19. Соколов С.В. Теорія систем і системний аналіз: конспект лекцій для студ. спец. 151 "Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології" освітнього ступеня "бакалавр" усіх форм навчання / С.В. Соколов. - Суми: СумДУ, 2020. - 171 с.

20. Greenhouse Crop Simulation Models and Microclimate Control Systems, A Review / URL: <https://www.intechopen.com/chapters/76412> (дата звернення: 28.12.2022).

21. Sensitivity Analysis of an Optimal Control Problem in Greenhouse Climate Management [E.JVan Henten Biosystems Engineering Volume 85, Issue 3](#), July 2003, Pages 355-364.

URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1537511003000680>

(дата звернення: 28.12.2022).

22. Modelling Crop Transpiration in Greenhouses: Different Models for Different Applications [Nikolaos Katsoulas, Cecilia Stanghellini](#) Agronomy 2019, 9(7), 392.

URL: <https://www.mdpi.com/2073-4395/9/7/392> (дата звернення: 28.12.2022).

23. Evaporation / URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Evaporation> (дата звернення: 28.12.2022).

24. Relative humidity to absolute humidity and vice versa calculators / URL: <https://planetcalc.com/2167/> (дата звернення: 28.12.2022).

25. Контроль і вимірювання в технологічних та енергетичних системах : конспект лекцій / укладачі: С. В. Соколов, О. С. Соколов, С. С. Антоненко. – Суми : Сумський державний університет, 2020. – 242 с.

26. MQ135 Sensor Datasheet / URL: <https://datasheetspdf.com/datasheet/MQ135.html> (дата звернення: 28.12.2022).

27. MQ-135 модуль датчика якості повітря / URL: <https://t-port.com.ua/ua/p1423632431-135-modul-datchika.html> (дата звернення: 28.12.2022).

28. Вибір оптимальних параметрів ПД-регулятора для керування мікрокліматом теплиці / А. В. Дідоренко, С. В. Соколов // Інформатика, математика, автоматика : матеріали та програма Міжнародної наукової конференції молодих вчених, Суми – Нур-Султан, 18–22 квітня 2022 р. / відп. за вип. О. О. Дрозденко. — Суми : СумДУ, 2022. — С. 134.