

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет водогосподарської інженерії та екології
Кафедра екології

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

Зав. кафедрою екології

доц. _____ Вікторія КАЦЕВИЧ

« _____ » червня 2026р.

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи освітнього ступеня «Бакалавр»
на тему: **«Екологічний аналіз сталих безґрунтових систем вирощування
у монокультурних теплицях»**

Виконала: здобувачка вищої освіти 4 курсу,
групи Е-1-22 спеціальності 101 «Екологія»

_____ Войченко М.Д.

Керівник _____ доц., к.с.-г.н Зленко І.Б

Рецензент _____ провідний біотехнолог ТОВ
«Біо Захист» Докторук А.М.

Дніпро 2026

ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет: Водогосподарської інженерії та екології

Кафедра: Екології

Освітньо-професійна програма: «Екологія»

Спеціальність: 101 «Екологія»

Ступінь вищої освіти Бакалавр

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедрою екології

доц. _____ Вікторія КАЦЕВИЧ

«_____» _____ 2026р.

З А В Д А Н Н Я

на підготовку кваліфікаційної роботи

Войченко Марії Денисівні

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Екологічний аналіз сталих безґрунтових систем вирощування у монокультурних теплицях

2. Науковий керівник: доц., к.с.-г.н Зленко І.Б

затверджена наказом по ДДАЕУ від «_____» №

3. Термін подання здобувачем роботи: _____ р.

4. Вихідні дані до роботи: Експериментальні дані щодо вирощування салатних культур у безґрунтових системах на різних субстратах.

5. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що їй належить розробити): Теоретико-екологічні аспекти безґрунтових тепличних систем. Умови і методика проведення досліджень. Результати досліджень та їх обговорення. Охорона праці.

6. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): Рисунків – 7, Таблиць – 6, Використаної літератури – 62, Розділів – 4, Сторінок – 85.

7. Дата видачі завдання: «_____» _____ 202_____ р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ пп	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Огляд літератури за темою дослідження	09.04.26-15.04.26	Виконано
2	Умови і методика проведення досліджень	09.06.25-13.07.25	Виконано
3	Результати досліджень та їх обговорення	15.01.26-30.03.26	Виконано
4	Охорона праці	30.04.26-05.05.26	Виконано
5	Оформлення дипломної роботи	06.05.26-06.05.26	Виконано

Здобувач (ка)

(підпис)

Марія ВОЙЧЕНКО

(Ім'я та прізвище)

Керівник роботи

(підпис)

Ірина ЗЛЕНКО

(Ім'я та прізвище)

ЗМІСТ

ВСТУП	6
1 ТЕОРЕТИКО-ЕКОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ БЕЗҐРУНТОВИХ ТЕПЛИЧНИХ СИСТЕМ.	9
1.1 Розвиток безґрунтових технологій вирощування рослин	9
1.2 Екологічні аспекти переходу до безґрунтових технологій	12
1.3 Особливості функціонування монокультурних тепличних систем ...	15
1.4 Безґрунтові субстрати в керованих агроєкосистемах	19
1.5 Мікробіом у сталому функціонуванні безґрунтових систем	22
1.6 Біологічний захист рослин у високотехнологічних тепличних комплексах	26
1.7 Управління параметрами мікроклімату в тепличних комплексах. ...	29
1.8 Автоматизація та цифровізація безґрунтового вирощування культур.	33
1.9 Екологічна ефективність безґрунтових систем.	38
2 УМОВИ І МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ.	42
2.1 Науково-виробнича діяльність компанії Рійк Цваан	42
2.2 Характеристика гідропонних систем компанії Рійк Цваан	44
2.3 Умови проведення досліджень	48
3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ.	52
3.1 Динаміка ростових процесів культур за використання різних субстратів.	52
3.2 Формування контрольованого мікробіому	57
3.3 Контроль якості рециркуляційного поживного розчину	63
4 ОХОРОНА ПРАЦІ.	68
4.1 Умови праці при дослідженні безґрунтових систем.	68
4.2 Аналіз небезпечних факторів у лабораторії.	70
4.3 Пожежна безпека та охорона праці в лабораторії.	73
ВИСНОВКИ	76
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	80

РЕФЕРАТ

Тема дипломної роботи: «Екологічний аналіз сталих безґрунтових систем вирощування у монокультурних теплицях». Дипломна робота складається зі вступу, 4 розділів, висновків та переліку посилань. Повний обсяг роботи становить 85 сторінок друкованого тексту, включаючи 7 рисунків та 6 таблиць. Перелік використаних джерел містить 62 найменування.

Мета дослідження – провести екологічну оцінку безґрунтових систем вирощування салатних культур за використання різних субстратів та біологічного препарату.

Об'єкт дослідження – безґрунтові системи вирощування салатних культур у монокультурних теплицях.

Предмет дослідження – особливості формування контрольованого мікробіому ризосфери та екологічна ефективність використання мінеральної вати і кокосового субстрату.

Завдання дослідження:

- дослідити вплив різних субстратів на ріст і розвиток салатних культур;
- оцінити вплив препарату «Хетомік» на формування мікробіому ризосфери;
- визначити вплив біопрепарату на фітосанітарний стан рослин;
- провести екологічну оцінку використаних субстратів.

Методи дослідження: лабораторні та тепличні дослідження, мікробіологічний аналіз, статистична обробка результатів.

Ключові слова: БЕЗҐРУНТОВІ ТЕХНОЛОГІЇ, ГІДРОПОНІКА, МІКРОБІОМ, САЛАТНІ КУЛЬТУРИ, КОКОСОВИЙ СУБСТРАТ, МІНЕРАЛЬНА ВАТА, ФІТОСАНІТАРНИЙ СТАН.

ВСТУП

Сучасний розвиток сільського господарства відбувається в умовах постійного зростання чисельності населення, урбанізації територій, скорочення площ придатних для землеробства земель та посилення антропогенного навантаження на навколишнє природне середовище. За прогнозами міжнародних організацій, у найближчі десятиліття потреба у продовольстві суттєво зростатиме, що вимагає пошуку нових підходів до виробництва рослинницької продукції. Одночасно дедалі більшої актуальності набувають питання збереження родючості ґрунтів, раціонального використання природних ресурсів та мінімізації негативного впливу аграрного виробництва на довкілля.

Традиційні системи вирощування рослин значною мірою залежать від стану ґрунтового середовища, яке виконує функції джерела поживних речовин, води та місця існування великої кількості мікроорганізмів. Проте багаторічне інтенсивне використання земельних ресурсів призводить до деградації ґрунтів, зниження їхньої родючості, накопичення патогенних організмів та необхідності застосування значних обсягів мінеральних добрив і засобів захисту рослин. Особливо гостро ці проблеми проявляються в умовах інтенсивного тепличного виробництва, де постійне використання ґрунту сприяє накопиченню фітопатогенів та ускладнює контроль за фітосанітарним станом агроценозу.

Одним із найбільш перспективних напрямів розвитку сучасного овочівництва є впровадження безґрунтових технологій вирощування рослин. Використання мінеральної вати, кокосового субстрату та інших інертних матеріалів дозволяє повністю виключити фактор ґрунту із виробничого процесу та створити контрольоване середовище для росту і розвитку культур. У таких системах забезпечення рослин елементами живлення здійснюється за допомогою

спеціально підготовлених поживних розчинів, склад яких може коригуватися відповідно до потреб культури на різних етапах онтогенезу.

Важливою перевагою безґрунтових технологій є висока стерильність субстратів на початковому етапі вирощування. На відміну від природного ґрунту, який містить сформовані мікробні угруповання та потенційно небезпечні фітопатогени, мінеральна вата та кокосовий субстрат дозволяють формувати мікробіом ризосфери практично з нуля. Це створює можливість цілеспрямованого керування складом мікроорганізмів у прикореневій зоні та застосування біологічних препаратів як основного інструменту підтримання фітосанітарного благополуччя рослин.

Особливого значення в сучасних умовах набуває використання антагоністичних мікроорганізмів для біологічного контролю патогенів. Формування контрольованого мікробіому ризосфери дозволяє створювати стійкі мікробні угруповання, які пригнічують розвиток фітопатогенних грибів та бактерій, знижують ризик виникнення захворювань і сприяють підвищенню продуктивності рослин. Такий підхід відповідає сучасним принципам біологізації землеробства та забезпечує можливість зменшення використання хімічних засобів захисту рослин.

Застосування біологічних препаратів у безґрунтових системах є значно ефективнішим порівняно з традиційним ґрунтовим виробництвом. У природних ґрунтах існує складна система взаємодій між різними групами мікроорганізмів, яка часто перешкоджає закріпленню внесених корисних штамів. Натомість стерильне середовище субстратів дозволяє спрямовано формувати ризосферний мікробіом і підтримувати його структуру протягом усього періоду вирощування культури.

Сучасні безґрунтові технології дедалі частіше інтегруються у концепцію «розумної теплиці» (Smart Greenhouse), яка передбачає автоматизований контроль параметрів мікроклімату, живлення рослин, освітлення та фітосанітарного стану агроценозу. Використання систем моніторингу, цифрових датчиків, автоматизованого керування живленням та високоефективного

світлодіодного освітлення дозволяє максимально реалізувати потенціал культури та забезпечити стабільне виробництво продукції незалежно від зовнішніх умов.

Особливо актуальними такі технології є для густонаселених регіонів світу, де існує дефіцит земельних ресурсів та висока потреба у свіжій продукції. У Нідерландах, Японії, Сінгапурі та інших країнах активно розвиваються вертикальні ферми та високотехнологічні тепличні комплекси, які дозволяють вирощувати овочеву продукцію безпосередньо в межах міських агломерацій. Це сприяє скороченню логістичних витрат, зменшенню вуглецевого сліду продукції та забезпеченню населення свіжими овочами протягом усього року.

Важливим напрямом розвитку безґрунтових технологій є також оцінка екологічної безпечності використовуваних субстратів. Після завершення виробничого циклу виникає необхідність утилізації або повторного використання мінеральної вати та кокосового субстрату. Тому особливого значення набуває дослідження екологічних аспектів їх застосування та визначення потенційного вуглецевого сліду різних технологічних рішень.

У зв'язку з цим актуальним є вивчення процесів формування контрольованого мікробіому ризосфери, оцінка ефективності біологічних препаратів та визначення екологічних переваг безґрунтових систем вирощування. Такі дослідження мають важливе практичне значення для впровадження сучасних екологічно безпечних технологій виробництва овочевої продукції в Україні та сприяють розвитку сталого тепличного господарства відповідно до світових тенденцій розвитку аграрного сектору.

1 ТЕОРЕТИКО-ЕКОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ БЕЗҐРУНТОВИХ ТЕПЛИЧНИХ СИСТЕМ

1.1 Розвиток безґрунтових технологій вирощування рослин

Безґрунтові технології вирощування рослин набувають дедалі більшого поширення у світовому агровиробництві внаслідок посилення екологічних проблем, скорочення площ придатних для землеробства ґрунтів та необхідності забезпечення стабільного виробництва продовольства в умовах урбанізації та змін клімату. Традиційне ґрунтове землеробство супроводжується деградацією земельних ресурсів, засоленням, ерозійними процесами, накопиченням фітопатогенних мікроорганізмів і значними втратами води та мінеральних добрив. У зв'язку з цим безґрунтові системи розглядаються як альтернатива, що дозволяє значно підвищити контрольованість процесу вирощування та мінімізувати негативний вплив на навколишнє середовище.

Основою безґрунтових технологій є вирощування рослин у водному або інертному середовищі без використання природного ґрунту. У таких системах коренева система рослин забезпечується всіма необхідними елементами живлення через поживний розчин із чітко визначеним хімічним складом. Це створює можливість точного регулювання надходження макро- і мікроелементів відповідно до фізіологічних потреб культури на різних етапах розвитку. Контрольований характер живлення дозволяє уникнути дефіциту або надлишку поживних речовин, що позитивно впливає на продуктивність рослин та якість отриманої продукції [1].

Перші наукові дослідження безґрунтового вирощування були спрямовані переважно на вивчення фізіології живлення рослин та ролі окремих елементів у

їх рості й розвитку. Проте стрімкий розвиток тепличного господарства, автоматизації виробничих процесів, систем фертигації та кліматичного контролю сприяв переходу безґрунтових технологій із лабораторних досліджень у масштабне комерційне виробництво. Сьогодні ці системи широко застосовуються у тепличному овочівництві, декоративному рослинництві, виробництві зеленних культур, а також у вертикальному фермерстві та урбанізованих агросистемах.

Серед найбільш поширених безґрунтових технологій виділяють гідропоніку, аеропоніку та субстратне вирощування. У гідропонних системах коренева система рослин безпосередньо контактує з поживним розчином, що забезпечує швидке засвоєння елементів живлення. Аеропоніка передбачає вирощування рослин у повітряному середовищі з періодичним зволоженням коренів аерозольним поживним розчином. Субстратні системи базуються на використанні інертних матеріалів, серед яких найпоширенішими є мінеральна вата, кокосове волокно, перліт, вермикуліт та керамзит. Такі субстрати виконують переважно функцію механічної підтримки кореневої системи та не є активним джерелом патогенної мікрофлори [2].

Використання стерильних або контрольовано стерильних субстратів є важливою перевагою безґрунтових технологій. У традиційних ґрунтових агросистемах мікробіом формується природним шляхом та включає значну кількість різних мікроорганізмів, серед яких можуть бути фітопатогени. Такі мікробні угруповання часто є складними для регулювання, оскільки між мікроорганізмами виникає конкуренція за поживні ресурси, а внесення біологічних препаратів не завжди забезпечує прогнозований результат. У безґрунтових системах кореневе середовище формується практично з нуля, що дозволяє контролювати склад мікрофлори шляхом внесення корисних мікроорганізмів, грибів-антагоністів та біопрепаратів. Це створює умови для формування стабільного та керованого мікробіому кореневої зони [3].

Особливого значення у сучасних безґрунтових технологіях набуває біологічний захист рослин. Завдяки стерильності субстратів та ізолюваності

кореневого середовища зменшується ризик зараження рослин ґрунтовими інфекціями. У таких системах значно простіше застосовувати біологічні методи контролю, оскільки корисні мікроорганізми не змушені конкурувати з уже сформованими ґрунтовими угрупованнями. Для пригнічення розвитку патогенів використовують грибні антагоністи, ризосферні бактерії, біологічно активні метаболіти мікроорганізмів та культуральні рідини. Це дозволяє скоротити використання хімічних засобів захисту рослин і підвищити екологічну безпечність продукції.

Важливою перевагою безґрунтових систем є висока ефективність використання ресурсів. У сучасних тепличних комплексах широко застосовуються замкнуті системи рециркуляції поживного розчину, які дозволяють повторно використовувати воду та мінеральні елементи після відповідного очищення і корекції складу. Це значно зменшує втрати ресурсів і мінімізує забруднення навколишнього середовища. За даними досліджень, витрати води у гідропонних системах можуть бути у декілька разів нижчими порівняно з традиційним вирощуванням у відкритому ґрунті [4].

Суттєвий вплив на розвиток безґрунтового вирощування має впровадження цифрових технологій та концепції «розумної теплиці». Сучасні тепличні комплекси обладнуються системами автоматичного моніторингу температури, вологості повітря, концентрації вуглекислого газу, електропровідності та рН поживного розчину. Сенсорні системи та програмне забезпечення забезпечують постійний аналіз параметрів середовища й автоматичне регулювання умов вирощування відповідно до потреб культури. Важливу роль також відіграє використання LED-освітлення, яке дозволяє оптимізувати спектральний склад світла та знизити енергетичні витрати.

Інтенсивний розвиток безґрунтових технологій спостерігається у країнах із високою щільністю населення та дефіцитом земельних ресурсів. Нідерланди є одним зі світових лідерів у галузі високотехнологічного тепличного виробництва, де широко використовуються автоматизовані системи живлення та клімат-контролю. У Японії та Сінгапурі активно розвиваються вертикальні

ферми та міські тепличні комплекси, інтегровані в інфраструктуру мегаполісів. Такий підхід дозволяє скорочувати логістичні витрати, забезпечувати населення свіжою продукцією та знижувати вуглецевий слід, пов'язаний із транспортуванням овочів та зелені [5].

Перспективність безґрунтових технологій також пов'язана з можливістю їх використання у системах вертикального фермерства та урбанізованого агровиробництва майбутнього. В умовах подальшого зростання чисельності населення та урбанізації такі системи можуть стати важливим елементом забезпечення продовольчої безпеки великих міст. Вирощування рослин у контрольованих умовах безпосередньо у межах мегаполісів дозволяє скоротити час між збиранням урожаю та споживанням продукції, зберегти її свіжість та зменшити залежність від сезонних факторів.

Розвиток безґрунтових технологій вирощування рослин відображає перехід сучасного агровиробництва до більш керованих, ресурсоефективних та екологічно безпечних систем. Контрольованість кореневого середовища, можливість формування сприятливого мікробіому, скорочення використання пестицидів і раціональне використання ресурсів створюють передумови для подальшого поширення цих технологій у світовому та українському тепличному виробництві [6].

1.2 Екологічні аспекти переходу до безґрунтових технологій

Перехід до безґрунтових технологій вирощування рослин пов'язаний із необхідністю реагування на сучасні екологічні виклики, які виникають унаслідок інтенсивного ведення сільського господарства. Традиційні агросистеми протягом тривалого часу зазнають значного антропогенного навантаження, що проявляється у деградації ґрунтів, виснаженні агроєкосистем, накопиченні фітопатогенних організмів та надмірному використанні хімічних засобів захисту

рослин. У таких умовах безґрунтові системи розглядаються як один із напрямів екологізації сучасного агровиробництва [7].

Однією з ключових передумов розвитку безґрунтових технологій є погіршення стану земельних ресурсів у світі. За даними Продовольчої та сільськогосподарської організації ООН, понад 1,6 млрд гектарів земель вже зазнали деградації внаслідок нераціонального використання, причому понад 60% цієї деградації припадає саме на сільськогосподарські угіддя. Щороку людство втрачає близько 100 млн гектарів продуктивних земель через ерозію, засолення, виснаження органічної речовини та інші деградаційні процеси.

Інтенсивне ґрунтове землеробство супроводжується порушенням природного балансу агроєкосистем. Постійне вирощування монокультур, механічний обробіток ґрунту та внесення високих доз мінеральних добрив призводять до зниження вмісту гумусу, погіршення структури ґрунту та втрати біологічного різноманіття мікроорганізмів. За оцінками міжнародних досліджень, близько 25 % світових сільськогосподарських земель перебувають у стані сильної деградації, а ще близько 44 % — у стані помірного виснаження.

Окремою екологічною проблемою традиційного землеробства є накопичення фітопатогенних організмів у ґрунті. У ґрунтовому середовищі формується складний мікробіом, до складу якого входять бактерії, гриби та інші мікроорганізми, серед яких значна частина може бути патогенною для рослин. При тривалому вирощуванні одних і тих самих культур у теплицях або на обмежених площах спостерігається накопичення збудників коренових гнилей, фузаріозу, пітіозу та інших захворювань. Це створює необхідність постійного застосування фунгіцидів та дезінфекційних заходів [8].

Безґрунтові системи вирощування дозволяють суттєво знизити ризик розвитку ґрунтових інфекцій завдяки використанню стерильних або контрольовано стерильних субстратів. Мінеральна вата, кокосовий субстрат, перліт та інші інертні матеріали не містять природного патогенного мікробіому, що створює можливість формування контрольованого кореневого середовища. У таких умовах значно простіше застосовувати біологічні методи захисту

рослин, зокрема гриби-антагоністи, ризосферні бактерії та біопрепарати на основі культуральних рідин мікроорганізмів. Це дозволяє підтримувати стабільний склад мікрофлори та знижувати ймовірність розвитку патогенних процесів.

Важливою екологічною перевагою безґрунтових технологій є скорочення використання пестицидів. У контрольованих умовах тепличних комплексів рослини менше контактують із зовнішнім середовищем, бур'янами та ґрунтовими шкідниками, що зменшує потребу у хімічному захисті. У багатьох сучасних гідропонних системах застосовується інтегрований біологічний захист із використанням ентомофагів, біофунгіцидів та мікробіологічних препаратів. Дослідження свідчать, що у контрольованих системах вирощування потреба у використанні пестицидів може бути значно нижчою порівняно з традиційним ґрунтовим землеробством [9].

Ще одним важливим екологічним аспектом є мінімізація антропогенного впливу на земельні ресурси. Безґрунтові технології дозволяють вирощувати продукцію без залучення значних площ родючих земель, що особливо актуально в умовах урбанізації та скорочення сільськогосподарських територій. Розвиток вертикального фермерства та багатоярусних тепличних систем дає можливість виробляти овочеву продукцію безпосередньо в межах міст або поблизу споживача. Це сприяє скороченню транспортних витрат, зменшенню викидів вуглекислого газу та збереженню природних екосистем від подальшого освоєння під агровиробництво.

Важливим фактором є також ефективніше використання водних ресурсів. У замкнених гідропонних системах поживний розчин циркулює повторно після очищення та корекції складу, що дозволяє значно скоротити втрати води. За оцінками FAO, сільське господарство сьогодні споживає понад 70 % світових запасів прісної води, тому впровадження ресурсоефективних технологій стає важливою умовою забезпечення сталого розвитку аграрного сектору [10].

Таким чином, перехід до безґрунтових технологій вирощування рослин має важливе екологічне значення, оскільки дозволяє зменшити деградацію

земель, контролювати фітопатогенне навантаження, скоротити використання пестицидів та підвищити ефективність використання природних ресурсів. Контрольованість таких систем створює передумови для формування більш безпечного та сталого агровиробництва, адаптованого до сучасних екологічних і соціальних викликів [11].

1.3 Особливості функціонування монокультурних тепличних систем

Монокультурні тепличні системи являють собою високоспеціалізовані агровиробничі комплекси, у межах яких здійснюється тривале інтенсивне вирощування однієї культури або генетично близьких культур у контрольованих умовах середовища. Основною особливістю таких систем є максимальна концентрація технологічних ресурсів на забезпеченні оптимальних умов для конкретного виду рослин, що дозволяє досягати високих показників урожайності, однорідності продукції та стабільності виробництва незалежно від сезонних коливань зовнішнього середовища. Найчастіше в умовах монокультурних теплиць вирощують томати, огірки, перець, суницю садову, салатні культури та зелень, які характеризуються високою рентабельністю та швидкою реакцією на регулювання факторів середовища [12].

Функціонування монокультурних систем базується на принципі повного або часткового контролю основних екологічних факторів: температури, вологості повітря, світлового режиму, концентрації вуглекислого газу, мінерального живлення та водозабезпечення. У сучасних тепличних комплексах рослина розглядається як центральний елемент технологічної системи, навколо якого формується кероване середовище з мінімізацією випадкових або неконтрольованих впливів. Такий підхід забезпечує високу передбачуваність продукційних процесів та дозволяє оптимізувати фізіологічні реакції рослин відповідно до потреб конкретної культури [13].

Специфіка монокультурного вирощування полягає також у формуванні спрощеної агроєкосистеми зі зниженою біологічною різноманітністю. На відміну від природних або багатокomпонентних агроценозів, монокультура характеризується домінуванням одного виду рослин, що призводить до однотипності корневих виділень, стабільного накопичення специфічних органічних сполук та формування вузькоспеціалізованих мікробних угруповань. У результаті цього створюються сприятливі умови для адаптації та поширення окремих видів фітопатогенних мікроорганізмів, здатних ефективно використовувати доступні екологічні ніші [14].

Однією з найбільш суттєвих проблем монокультурних тепличних систем є накопичення фітопатогенного навантаження. У процесі тривалого вирощування однієї культури в кореновому середовищі поступово збільшується концентрація патогенних грибів, бактерій та вірусів, адаптованих до конкретного рослинного господаря. Особливо поширеними у тепличному виробництві є представники родів *Fusarium*, *Pythium*, *Phytophthora*, *Rhizoctonia* та *Verticillium*, які спричиняють кореневі гнилі, судинні ураження та пригнічення ростових процесів рослин. У закритих агросистемах швидкість поширення інфекцій значно вища порівняно з відкритим ґрунтом через стабільність мікроклімату, високу щільність посадки та постійну наявність рослини-господаря.

Особливу небезпеку становить формування так званої «втоми субстрату» або «втоми середовища», коли навіть за відсутності явних симптомів захворювання відбувається поступове погіршення фізіологічного стану рослин через накопичення токсичних метаболітів мікроорганізмів, залишків корневих ексудатів та умовно патогенних форм мікробіоти. У ґрунтових системах такі процеси часто супроводжуються необхідністю проведення хімічної дезінфекції, пропарювання або повної заміни ґрунту, що потребує значних матеріальних та енергетичних витрат [15].

Перехід до безґрунтових технологій значною мірою дозволяє мінімізувати зазначені ризики. Використання інертних субстратів - мінеральної вати, кокосового волокна, перліту, вермикуліту чи керамзиту - створює

контрольоване кореневе середовище з низьким рівнем природного мікробного забруднення. На відміну від природного ґрунту, де мікробіом формується протягом тривалого часу та характеризується складною структурою взаємодій, у безґрунтових системах можливо цілеспрямовано моделювати склад ризосферної мікрофлори. Це відкриває можливість використання керованих мікробіологічних консорціумів, біопрепаратів та грибів-антагоністів для підтримання фітосанітарної стабільності кореневої зони [16].

У сучасних тепличних комплексах активно впроваджується концепція біологізації захисту рослин, відповідно до якої перевага надається використанню корисних мікроорганізмів замість інтенсивного застосування хімічних пестицидів. Значне поширення отримали препарати на основі *Trichoderma spp.*, *Bacillus subtilis*, *Pseudomonas fluorescens* та інших антагоністичних мікроорганізмів, здатних пригнічувати розвиток патогенів через конкуренцію за субстрат, синтез антибіотичних речовин або стимуляцію імунних реакцій рослин. У контрольованих умовах безґрунтового вирощування ефективність таких біологічних агентів є вищою, оскільки вони не конкурують із великою кількістю природної ґрунтової мікрофлори.

Важливе значення для функціонування монокультурних тепличних систем має формування та підтримання оптимального мікроклімату. Мікроклімат теплиць являє собою комплекс фізичних параметрів середовища, які безпосередньо впливають на інтенсивність фотосинтезу, транспірацію, поглинання елементів живлення та швидкість метаболічних процесів у рослинах. До основних параметрів мікроклімату належать температура повітря і субстрату, відносна вологість повітря, швидкість циркуляції повітряних потоків, концентрація CO₂ та характеристики освітлення [17].

Сучасні тепличні комплекси обладнані автоматизованими системами клімат-контролю, що функціонують на основі мережі сенсорів та програмного забезпечення. Такі системи забезпечують безперервний моніторинг екологічних параметрів та оперативне коригування умов вирощування відповідно до фізіологічних потреб рослин. Регуляція мікроклімату здійснюється за

допомогою систем вентиляції, обігріву, випарного охолодження, затінення, туманоутворення та додаткового LED-освітлення.

Особливу роль у сучасному тепличному виробництві відіграють світлодіодні системи освітлення. Використання LED-технологій дозволяє регулювати спектральний склад світла та адаптувати його до конкретних етапів росту рослин. Синій спектр стимулює розвиток вегетативної маси та фотосинтетичну активність, тоді як червоний — впливає на процеси цвітіння та формування врожаю. Оптимізація світлового режиму дозволяє не лише підвищити продуктивність культур, але й зменшити енергетичні витрати тепличного виробництва.

Однією з ключових характеристик монокультурних тепличних систем є високий рівень керованості продукційних процесів. Завдяки автоматизації технологічних операцій з'являється можливість прогнозування росту рослин, контролю швидкості накопичення біомаси та оптимізації врожайності. У безґрунтових системах контроль поживного режиму здійснюється через фертигацію - подачу елементів живлення разом із поливною водою у вигляді поживного розчину з точно визначеними параметрами рН та електропровідності.

У сучасних системах застосовуються технології рециркуляції поживного розчину, що дозволяє повторно використовувати воду та мінеральні елементи після їх очищення та корекції складу. Такий підхід суттєво підвищує ресурсоефективність виробництва та мінімізує втрати добрив у навколишнє середовище. Крім того, автоматизовані системи здатні аналізувати фізіологічний стан рослин у режимі реального часу на основі даних сенсорів, тепловізійного контролю та комп'ютерного аналізу зображень [18].

Інтеграція цифрових технологій у тепличне виробництво формує концепцію «розумної теплиці», у межах якої всі елементи системи функціонують як єдина інформаційно-керована структура. Використання штучного інтелекту, алгоритмів прогнозування та систем дистанційного моніторингу дозволяє оптимізувати продукційні процеси, знижувати енергетичні витрати та підвищувати екологічну безпечність виробництва.

Монокультурні тепличні системи є складними високотехнологічними агроєкосистемами, функціонування яких базується на поєднанні контрольованого мікроклімату, керованого живлення, біологічного захисту та автоматизованого управління продукційними процесами. Незважаючи на ризики накопичення патогенів та зниження біорізноманіття, використання безґрунтових технологій і сучасних систем моніторингу створює передумови для формування стабільних, ресурсоефективних та екологічно безпечних моделей тепличного виробництва [19].

1.4 Безґрунтові субстрати в керованих агроєкосистемах

Функціонування сучасних безґрунтових систем вирощування значною мірою визначається властивостями субстратів, які виконують роль штучного кореневого середовища. Саме субстрат забезпечує утримання води, аерацію кореневої системи, підтримання оптимального співвідношення повітряної та водної фаз, а також стабільність фізико-хімічних параметрів у зоні ризосфери. У контрольованих агроєкосистемах тепличного типу субстрати виступають одним із ключових елементів регулювання продукційного процесу, оскільки дозволяють точно керувати мінеральним живленням, вологою та фітосанітарним станом рослин [20].

У промисловому тепличному овочівництві найбільшого поширення набули мінеральна вата, кокосовий субстрат, перліт, вермикуліт, торф'яні суміші, деревне волокно та інші органічні й неорганічні матеріали. Вибір субстрату залежить від технології вирощування, біологічних особливостей культури, системи зрошення, економічної доцільності та екологічних вимог виробництва.

Мінеральна вата є одним із найпоширеніших субстратів у високотехнологічних тепличних комплексах. Вона характеризується високою

пористістю, значною вологоємністю та стабільністю структури протягом усього циклу вирощування. Завдяки однорідності матеріалу створюються умови для рівномірного розподілу води й поживних речовин у кореневій зоні. Важливою перевагою мінеральної вати є її стерильність, що суттєво знижує ризик розвитку ґрунтових патогенів та нематод. Крім того, інертність субстрату дозволяє повністю контролювати склад живильного розчину та оперативно коригувати елементи мінерального живлення відповідно до фаз росту рослин [21].

Разом із цим використання мінеральної вати має низку екологічних обмежень. Матеріал виготовляється шляхом плавлення гірських порід при високих температурах, що супроводжується значними енерговитратами та викидами CO₂. Після завершення експлуатації субстрат практично не розкладається в природному середовищі, що створює проблему утилізації відходів тепличного виробництва. У сучасних дослідженнях підкреслюється необхідність пошуку більш екологічно безпечних альтернатив мінеральній ваті, особливо у контексті концепції циркулярної економіки та декарбонізації аграрного сектору.

Кокосовий субстрат (coir, coco peat) останніми роками активно використовується як альтернатива традиційним інертним матеріалам. Його отримують із відходів переробки кокосового горіха, що робить даний субстрат відновлюваним ресурсом. Кокосове волокно характеризується високою повітропроникністю, добрими показниками вологутримання та здатністю підтримувати стабільний водно-повітряний режим у прикореневій зоні. На відміну від торфу, кокосовий субстрат має кращу здатність до повторного зволоження після висихання, що позитивно впливає на стабільність водозабезпечення рослин [22].

Водночас фізико-хімічні характеристики кокосового субстрату можуть суттєво варіювати залежно від походження сировини та способу її обробки. У науковій літературі зазначається, що матеріал може містити підвищені концентрації натрію та калію, особливо якщо кокосова сировина оброблялась морською водою або вирощувалась у прибережних регіонах. Тому перед

використанням субстрат проходить етап промивання та буферизації кальцієвими сполуками для стабілізації катіонного складу [23].

Серед альтернативних субстратів значну увагу привертають деревне волокно, компостовані органічні матеріали, біовугілля, перліт та вермикуліт. Деревне волокно характеризується високою аераційною здатністю та низькою щільністю, проте може викликати тимчасове зв'язування азоту мікроорганізмами у процесі біодеструкції органічної речовини. Перліт і вермикуліт належать до інертних мінеральних матеріалів із високою пористістю та доброю капілярністю, завдяки чому широко застосовуються у розсадних технологіях і гідропонних системах. Біовугілля розглядається як перспективний субстрат завдяки здатності адсорбувати поживні речовини, покращувати мікробіологічну активність середовища та знижувати втрати елементів живлення.

Однією з головних переваг безґрунтових субстратів є можливість підтримання стерильного або контрольованого фітосанітарного середовища. На відміну від ґрунту, який часто є резервуаром фітопатогенів, субстрати дозволяють значно знизити ризик ураження рослин кореневими гнилями, фузаріозом, пітіумом та іншими хворобами. Це особливо важливо в умовах монокультурного тепличного виробництва, де накопичення патогенів відбувається інтенсивніше через тривале вирощування однієї культури. Стерильність субстратів також сприяє скороченню використання хімічних засобів захисту рослин, що має важливе екологічне значення.

Фізико-хімічні властивості субстратів безпосередньо визначають ефективність функціонування всієї безґрунтової системи. До основних параметрів належать щільність, загальна пористість, співвідношення повітряної та водної ємності, рН середовища, електропровідність та катіонно-обмінна здатність. Оптимальний субстрат повинен забезпечувати достатній доступ кисню до кореневої системи при одночасному утриманні необхідного об'єму вологи. Порушення цих показників може призводити до гіпоксії коренів, накопичення токсичних солей або дефіциту поживних елементів [24].

Екологічна оцінка субстратів у сучасних тепличних системах стає дедалі важливішою у зв'язку з необхідністю зменшення антропогенного навантаження на довкілля. Наукові дослідження свідчать, що традиційне використання торфу пов'язане з деградацією болотних екосистем та вивільненням значних обсягів вуглецю в атмосферу. За даними міжнародних оцінок, видобування торфу супроводжується руйнуванням природних вуглецевих резервуарів і негативно впливає на біорізноманіття. У зв'язку з цим у країнах ЄС активно впроваджуються програми скорочення використання торф'яних субстратів та пошуку відновлюваних альтернатив.

Субстрати в безґрунтових агроекосистемах виконують не лише функцію фізичної підтримки рослин, але й є важливим інструментом регулювання водного, повітряного та поживного режимів. Вибір субстрату визначає продуктивність тепличної системи, рівень екологічної безпеки виробництва та ефективність використання природних ресурсів. Сучасні тенденції розвитку тепличного рослинництва орієнтовані на використання відновлюваних, екологічно безпечних і ресурсоефективних субстратів, здатних забезпечити стабільне функціонування керованих агроекосистем [25].

1.5 Мікробіом у сталому функціонуванні безґрунтових систем

У сучасних безґрунтових системах вирощування дедалі більшого значення набуває дослідження мікробіому кореневої зони рослин. Попри те, що гідропонні та субстратні технології традиційно розглядалися як майже стерильні середовища, останні наукові дослідження свідчать про формування в них складних мікробних угруповань, здатних суттєво впливати на ріст, продуктивність і стійкість рослин до стресових чинників. Мікробіом у таких системах розглядається як важливий функціональний компонент керованої агроекосистеми, який бере участь у трансформації поживних речовин,

підтриманні фітосанітарної стабільності та регуляції фізіологічного стану рослин.

Мікробіом безґрунтових систем являє собою сукупність бактерій, грибів та інших мікроорганізмів, які колонізують кореневу систему, поверхню субстрату, циркуляційні розчини та елементи іригаційної інфраструктури. У природних ґрунтових екосистемах мікроорганізми формують складні симбіотичні взаємозв'язки з рослинами, забезпечуючи мінералізацію органічної речовини, мобілізацію елементів живлення та пригнічення розвитку фітопатогенів. У безґрунтових агроекосистемах аналогічні процеси також відбуваються, однак за умов значно вищої технологічної контрольованості середовища [26].

Особливістю гідропонних і субстратних технологій є те, що мікробні спільноти формуються практично з нуля після висаджування рослин. На відміну від ґрунту, де існує потужний резервуар природної мікробіоти, мінеральна вата, перліт, кокосовий субстрат та інші інертні матеріали спочатку характеризуються майже повною стерильністю. Це створює умови для контрольованого заселення ризосфери мікроорганізмами, які потрапляють із водою, посадковим матеріалом, повітрям або через технологічне обладнання. Таким чином, безґрунтові системи дають можливість цілеспрямовано формувати склад мікробіому шляхом внесення корисних мікроорганізмів та регуляції параметрів середовища.

У дослідженнях, присвячених функціонуванню мікробіому в рециркуляційних безґрунтових системах, важливе місце займають роботи нідерландського вченого Еріка А. ван Оса (Eric A. van Os) — співробітника Інституту сільськогосподарської та екологічної інженерії DLO (м. Вагенінген, Нідерланди). У його працях встановлено, що циркуляційні системи живлення, попри високий рівень технологічної контрольованості, створюють умови для швидкого поширення мікроорганізмів у межах усієї тепличної установки. Було показано, що мікробні угруповання активно формуються не лише у прикореневій зоні рослин, але й у живильному розчині, трубопроводах та на поверхнях технологічного обладнання. У роботах ван Оса підкреслюється, що замкнуті

гідропонні системи характеризуються підвищеним ризиком поширення фітопатогенів через рециркуляцію поживного розчину. За таких умов навіть локальне інфікування кореневої системи може призвести до швидкого зараження всієї виробничої системи [27].

Наукові дослідження підтверджують, що найбільш поширеними бактеріями у безґрунтових системах є представники родів *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Azospirillum*, *Enterobacter*, *Comamonas* та *Flavobacterium*. Значна частина цих мікроорганізмів належить до групи PGPR (Plant Growth-Promoting Rhizobacteria) - ризобактерій, які стимулюють ріст рослин. Вони здатні синтезувати фітогормони, продукувати антибіотичні речовини, покращувати засвоєння поживних елементів, активізувати антиоксидантну систему рослин і підвищувати їхню стійкість до абіотичних та біотичних стресів.

Однією з найважливіших функцій мікробіому є біологічний контроль фітопатогенів. У замкнених циркуляційних системах поширення патогенних організмів відбувається значно швидше, ніж у ґрунтових агроecosистемах. Особливо небезпечними для гідропонних культур є представники родів *Pythium* та *Phytophthora*, здатні викликати масове ураження кореневої системи через поширення зооспор у водному середовищі. Навіть незначне інфікування може спричинити зараження всієї системи циркуляції живильного розчину. Саме тому в сучасних тепличних комплексах застосовують багаторівневий санітарний контроль, який включає ультрафіолетову стерилізацію живильних розчинів, озонування, термічну обробку, мембранну фільтрацію та біофільтраційні системи [28].

Водночас сучасні дослідження свідчать про те, що повна стерилізація кореневого середовища не завжди є оптимальною стратегією. Надмірне використання дезінфектантів може призводити до руйнування корисної мікрофлори та формування нестабільного мікробного середовища, у якому вільні екологічні ніші швидко займаються патогенними організмами. У зв'язку з цим дедалі більшого поширення набуває концепція керованого мікробіому,

відповідно до якої стабільні спільноти корисних мікроорганізмів розглядаються як природний біологічний бар'єр проти розвитку патогенів.

Особливої актуальності набуває використання мікроорганізмів-антагоністів як агентів біологічного захисту. Представники *Bacillus subtilis*, *Trichoderma harzianum*, *Pseudomonas fluorescens* та інших мікробних культур здатні конкурувати з патогенами за поживні ресурси, синтезувати антибіотичні сполуки та стимулювати системну резистентність рослин. Використання таких біологічних агентів дозволяє суттєво знизити застосування фунгіцидів та інших хімічних препаратів у тепличному виробництві, що має важливе екологічне значення [29].

Важливу роль у функціонуванні мікробіому відіграють параметри кореневого середовища - температура, рН, електропровідність живильного розчину, рівень аерації та вміст органічних сполук. У безґрунтових системах саме технологічні умови визначають структуру мікробних угруповань. Зокрема, надмірне зволоження субстрату або недостатня аерація можуть створювати сприятливі умови для розвитку анаеробної мікрофлори та корневих гнилей. Натомість стабільні параметри середовища сприяють формуванню збалансованого мікробного комплексу, який позитивно впливає на фізіологічний стан рослин і стабільність продукційних процесів.

Окремим напрямом сучасних досліджень є концепція «мікробіомної інженерії» (*microbiome engineering*), яка передбачає цілеспрямоване формування корисних мікробних консорціумів у контрольованих агроєкосистемах. У науковій літературі активно досліджуються синтетичні мікробні консорціуми (*SynComs*), здатні стабілізувати функціонування гідропонних систем та підвищувати ефективність використання ресурсів. Сучасні методи метагеномного аналізу дозволяють детально вивчати структуру мікробіому та прогнозувати його вплив на продуктивність культур.

Крім захисної функції, мікробіом бере участь у трансформації поживних речовин та оптимізації мінерального живлення рослин. Деякі бактерії здатні переводити фосфор у доступні форми, фіксувати атмосферний азот або

продукувати органічні кислоти, які покращують засвоєння макро- та мікроелементів. Це особливо важливо в умовах замкнених систем рециркуляції, де необхідно підтримувати стабільний хімічний склад живильного розчину та мінімізувати втрати елементів живлення.

Таким чином, мікробіом у безґрунтових системах слід розглядати як один із ключових елементів сталого функціонування сучасних тепличних агроєкосистем. Контроль і оптимізація мікробних процесів створюють передумови для підвищення продуктивності культур, зниження хімічного навантаження на довкілля та забезпечення більш екологічно безпечного функціонування високотехнологічних систем вирощування рослин [30].

1.6 Біологічний захист рослин у високотехнологічних тепличних комплексах

У високотехнологічних тепличних комплексах, де салатні культури вирощуються переважно в умовах гідропоніки або на інертних субстратах, система захисту рослин має специфічні особливості, пов'язані із замкненістю агроєкосистеми, постійною циркуляцією живильного розчину та високою щільністю розміщення рослин. За таких умов навіть локальне інфікування здатне швидко поширюватися по всій системі, що створює підвищений ризик виникнення епіфітотій. Особливо це характерно для салату (*Lactuca sativa* L.), який має поверхневу кореневу систему, короткий вегетаційний цикл та високу чутливість до коливань мікроклімату і мікробіологічного стану кореневого середовища.

У тепличному виробництві салатів найбільш поширеними є кореневі та прикореневі хвороби, збудниками яких виступають *Pythium aphanidermatum*, *Pythium dissotocum*, *Fusarium oxysporum*, *Rhizoctonia solani* та *Olpidium brassicae*. У системах NFT (Nutrient Film Technique) та DWC (Deep Water Culture) патогени

роду *Pythium* становлять особливу небезпеку через здатність їхніх зооспор активно переміщуватися у водному середовищі. За температури живильного розчину понад 24–26 °C швидкість розвитку пітіозної кореневої гнилі суттєво зростає, а ураження кореневої системи призводить до порушення поглинання води та елементів живлення, пригнічення фотосинтетичної активності й втрати товарної якості продукції [31].

У зв'язку з цим у сучасних тепличних системах дедалі активніше використовуються біологічні методи контролю патогенів, які дозволяють зменшити застосування фунгіцидів та стабілізувати мікробіологічний стан агроєкосистеми. Одним із найбільш ефективних напрямів є використання грибів-антагоністів роду *Trichoderma*. У практиці тепличного овочівництва широко застосовуються препарати на основі *Trichoderma harzianum* та *Trichoderma asperellum*, які вносяться через систему фертигації або безпосередньо у субстрат.

Механізм дії *Trichoderma* є багатокомпонентним. Гриб активно колонізує поверхню коренів і субстрат, формуючи конкурентне середовище для патогенних мікроміцетів. Крім конкуренції за поживні речовини та простір, *Trichoderma* здатна продукувати антибіотичні сполуки - гліотоксини, віридини та пептаїболи, які пригнічують ріст фітопатогенів. Важливим механізмом є також мікопаразитизм: гіфи антагоніста обплітають гіфи патогенних грибів та руйнують їх за допомогою ферментів - хітиназ, целюлаз і β -1,3-глюканаз.

У салатних гідропонних системах інокуляція *Trichoderma harzianum* дозволяє знижувати розвиток корневих гнилей, спричинених *Pythium spp.*, у середньому на 50–70 %. Одночасно спостерігається збільшення маси кореневої системи, підвищення інтенсивності поглинання азоту та калію, а також покращення показників біомаси рослин. Дослідження демонструють, що колонізація ризосфери *Trichoderma* стимулює синтез ауксиноподібних речовин і активує антиоксидантну систему рослин, що особливо важливо в умовах інтенсивного тепличного виробництва [32].

Крім грибів-антагоністів, у системах біологічного захисту широко використовуються ризосферні бактерії PGPR-групи (Plant Growth-Promoting Rhizobacteria). Найчастіше застосовуються *Bacillus subtilis*, *Bacillus amyloliquefaciens*, *Pseudomonas fluorescens* та *Azospirillum brasilense*. Представники роду *Bacillus* формують ендоспори, що забезпечує їхню високу стійкість у системах рециркуляції живильних розчинів. Вони продукують ліпопептиди (ітурини, сурфактини, фенгіцини), які мають виражену фунгіцидну активність проти *Fusarium*, *Botrytis* та *Rhizoctonia*.

У салатних тепличних комплексах бактеріальні біопрепарати використовуються як профілактичний елемент захисту. Зокрема, внесення *Bacillus subtilis* у живильний розчин дозволяє формувати стабільну бактеріальну біоплівку на поверхні коренів. Така біоплівка виконує бар'єрну функцію та перешкоджає прикріпленню патогенів до кореневих тканин. Одночасно бактерії синтезують сидерофори - сполуки, які зв'язують іони заліза, обмежуючи доступ патогенів до цього елемента [33].

Важливим елементом біологічного контролю у високотехнологічних теплицях є управління мікробіотою циркуляційного розчину. У рециркуляційних системах накопичення органічних залишків і корневих ексудатів створює сприятливе середовище для розвитку умовно-патогенних мікроорганізмів. Для стабілізації мікробіологічного стану використовуються біофільтраційні системи, заселені нітрифікуючими та антагоністичними бактеріями. Біофільтри дозволяють знижувати концентрацію патогенів у розчині без повної стерилізації системи.

Сучасні підходи до біологічного захисту базуються на концепції «м'якого» біологічного впливу. Її суть полягає не у повному знищенні мікроорганізмів, а у формуванні стабільного супресивного мікробіому, здатного природним шляхом стримувати розвиток патогенів. Надмірна дезінфекція систем перекисом водню, хлором або сильними оксидантами часто призводить до руйнування корисної мікрофлори. Після цього вільні екологічні ніші швидко

займаються агресивними патогенами, що підвищує ризик повторного інфікування [34].

У сучасних салатних теплицях біологічний контроль дедалі частіше інтегрується з технологіями точного моніторингу. Системи автоматизованого контролю дозволяють регулювати температуру живильного розчину, вміст розчиненого кисню, рН та електропровідність, що безпосередньо впливає на розвиток мікробіоти. Наприклад, підтримання температури розчину на рівні 18–20 °C та концентрації розчиненого кисню понад 6 мг/л значно знижує ризик розвитку *Pythium*-інфекцій.

Перспективним напрямом є застосування синтетичних мікробних консорціумів (*SynComs*), до складу яких входять декілька штамів бактерій і грибів із різними функціональними властивостями. Такі комплекси можуть одночасно виконувати функції біологічного захисту, стимуляції росту та стабілізації кореневого мікробіому. Для салатних культур це особливо важливо через короткий цикл вирощування, де навіть незначне пригнічення росту швидко відображається на товарній продукції.

Таким чином, біологічний захист у сучасних тепличних комплексах слід розглядати як складову комплексного управління мікробіологічними процесами в керованій агроєкосистемі. Використання грибів-антагоністів, бактеріальних біопрепаратів і технологій мікробіомного контролю дозволяє не лише знижувати фітопатогенне навантаження, але й підвищувати стабільність продукційних процесів, мінімізувати застосування хімічних засобів захисту та забезпечувати екологічну безпечність салатної продукції [35].

1.7 Управління параметрами мікроклімату в тепличних комплексах

У сучасних високотехнологічних тепличних комплексах мікроклімат є одним із ключових факторів, що визначають ефективність функціонування

агроекосистеми, інтенсивність росту рослин, стабільність продукційних процесів та фітосанітарний стан насаджень. Для безґрунтових систем вирощування, зокрема салатних культур, параметри мікроклімату мають особливе значення, оскільки в умовах інтенсивного виробництва навіть незначні коливання температури, вологості чи освітлення можуть призводити до фізіологічних порушень, розвитку патогенів та зниження якості продукції.

Формування мікроклімату у тепличних спорудах базується на комплексній взаємодії факторів зовнішнього середовища та технологічних параметрів самої теплиці. До зовнішніх чинників належать сонячна радіація, температура атмосферного повітря, тривалість світлового дня, швидкість вітру та сезонні кліматичні особливості регіону. Внутрішні фактори охоплюють конструкцію теплиці, тип покривного матеріалу, систему вентиляції, режими опалення, зрошення, освітлення та фертигації. У сучасних тепличних комплексах більшість цих процесів автоматизована і контролюється комп'ютеризованими системами моніторингу [36].

Важливість оптимізації мікроклімату пояснюється тим, що продуктивність рослин безпосередньо залежить від дії лімітуючих факторів середовища. В основі сучасних агротехнологічних підходів лежить закон мінімуму Лібіха, відповідно до якого рівень урожайності визначається тим фактором, який перебуває у мінімумі. Навіть за оптимального забезпечення рослин водою, світлом і поживними речовинами нестача одного з компонентів мікроклімату може суттєво обмежувати інтенсивність ростових процесів та фотосинтетичну активність.

Одним із найважливіших компонентів мікроклімату є світловий режим. Для салатних культур світло визначає інтенсивність фотосинтезу, швидкість накопичення біомаси та формування якісних показників продукції. У зимово-весняний період дефіцит природного освітлення компенсується системами електродосвічування. У сучасних тепличних комплексах дедалі частіше використовуються LED-системи, які дозволяють регулювати спектральний склад випромінювання відповідно до фізіологічних потреб рослин. Найбільше

значення мають синій та червоний спектри, які безпосередньо впливають на фотосинтетичну активність, формування листкової поверхні та синтез хлорофілу.

Для салатних культур оптимальна інтенсивність фотосинтетично активної радіації становить у середньому 150–250 мкмоль/м²/с залежно від сорту та фази розвитку рослин. Недостатнє освітлення призводить до етіоляції, зниження щільності листків та накопичення нітратів, тоді як надмірне світлове навантаження може викликати фотоокиснювальний стрес і пригнічення ростових процесів. Світло також впливає на інтенсивність транспірації та водоспоживання рослин, тому параметри освітлення тісно пов'язані з температурним та водним режимом теплиці [37].

Температурний режим є одним із визначальних факторів формування продуктивності рослин. Температура безпосередньо впливає на швидкість ферментативних реакцій, фотосинтезу, дихання та транспірації. Для салату оптимальною вважається температура 18–22 °С у денний період та 14–18 °С у нічний час. При підвищенні температури понад 26–28 °С спостерігається посилення інтенсивності дихання, що супроводжується підвищенням використання накопичених асимілянтів. За температур понад 35–40 °С фотосинтетична активність різко знижується, а рослини переходять у стан фізіологічного стресу.

У тепличних технологіях температурний режим регулюють не лише для стимуляції росту, а й для оптимізації енергетичного балансу рослин. У нічний період температуру часто знижують, що дозволяє зменшити втрати органічних речовин на процеси дихання. Для салатних культур це має особливе значення, оскільки надмірне теплове навантаження сприяє передчасному стрілкуванню та погіршенню товарних якостей продукції.

У безґрунтових системах особливого значення набуває температура живильного розчину та кореневої зони. За підвищення температури розчину понад 24 °С знижується концентрація розчиненого кисню, що створює сприятливі умови для розвитку корневих гнилей, насамперед патогенів роду

Pythium. Тому у сучасних тепличних комплексах використовують системи охолодження, аерації та рециркуляції живильного розчину, які підтримують стабільність кореневого середовища [38].

Важливим елементом мікроклімату є режим вологості повітря та субстрату. Вода виконує ключову роль у транспортуванні поживних речовин, підтриманні тургору клітин та регуляції температури рослин через процес транспірації. Транспірація забезпечує рух води й мінеральних елементів від кореневої системи до надземних органів та одночасно виконує функцію природного охолодження рослини.

Для салатних культур оптимальна відносна вологість повітря становить 60–75 %. Надмірна вологість повітря сприяє розвитку грибкових захворювань, зокрема сірої гнилі (*Botrytis cinerea*), несправжньої борошнистої роси (*Bremia lactucae*) та бактеріозів. Крім того, за надлишкової вологості погіршується інтенсивність транспірації, що негативно впливає на поглинання кальцію та інших елементів живлення. Низька вологість, навпаки, викликає посилене випаровування води, водний дефіцит та фізіологічне в'янення рослин.

Для регулювання вологості у сучасних тепличних комплексах використовуються системи вентиляції, туманоутворення, конденсаційного осушення повітря та автоматизованого управління режимами поливу. Комп'ютеризовані системи здатні синхронізувати роботу вентиляції, опалення та фертигації, підтримуючи стабільний водний баланс у теплиці навіть за різких змін погодних умов.

Важливу роль у функціонуванні тепличних агроєкосистем відіграє повітряно-газовий режим. Основним компонентом є концентрація вуглекислого газу (CO_2), який використовується рослинами у процесі фотосинтезу. У закритих тепличних системах вміст CO_2 часто стає лімітуючим фактором росту, особливо за високої інтенсивності освітлення. Для підвищення продуктивності культур застосовується технологія контрольованого збагачення повітря вуглекислим газом (CO_2 -fertilization). Для салатних культур оптимальна концентрація CO_2

становить 800–1000 ppm, що дозволяє збільшувати інтенсивність фотосинтезу та підвищувати врожайність на 15–30 %.

Слід враховувати, що різні культури мають неоднакові вимоги до параметрів мікроклімату. Наприклад, огірок характеризується підвищеною потребою у теплі та вологості повітря, тоді як томат краще переносить нижчу вологість і більш інтенсивну вентиляцію. Салатні культури займають проміжне положення, однак особливо чутливо реагують на перегрівання та нестабільність водного режиму [39].

У сучасних тепличних комплексах управління мікрокліматом базується на принципах точного землеробства та цифровізації виробництва. Система датчиків безперервно контролює температуру, вологість, рівень CO₂, освітленість, pH та електропровідність живильного розчину. Отримані дані аналізуються програмним забезпеченням, яке автоматично регулює роботу вентиляційних систем, насосів, систем досвічування та фертигації.

Концепція «розумної теплиці» передбачає створення максимально керованого середовища, у якому всі параметри оптимізуються відповідно до біологічних потреб культури. Це дозволяє мінімізувати стресові фактори, зменшити ризик розвитку патогенів та підвищити ресурсну ефективність виробництва. Крім того, автоматизація мікрокліматичного контролю сприяє зниженню споживання води, енергії та агрохімікатів, що є важливою складовою екологічної сталості сучасних тепличних технологій [40].

1.8 Автоматизація та цифровізація безґрунтового вирощування культур

Сучасне безґрундове вирощування культур характеризується високим рівнем технологічної інтеграції та широким застосуванням автоматизованих систем управління виробничими процесами. У тепличних комплексах автоматизація є необхідною умовою забезпечення стабільності параметрів

мікроклімату, оптимізації використання ресурсів та підвищення продуктивності агроєкосистем. Особливо важливого значення цифровізація набуває у гідропонних та аеропонних системах, де рослини повністю залежать від штучно створеного середовища [41].

Автоматизація безґрунтових технологій базується на принципі безперервного моніторингу фізичних, хімічних і біологічних параметрів середовища вирощування. Основними контрольованими показниками є температура повітря та кореневої зони, відносна вологість, концентрація CO₂, інтенсивність освітлення, рН та електропровідність (ЕС) живильного розчину, рівень розчиненого кисню, вологість субстрату та швидкість циркуляції розчину. Для збору даних використовуються електронні сенсори та датчики, які працюють у режимі реального часу. Успішне функціонування безґрунтових систем потребує ретельного контролю всіх параметрів середовища, оскільки навіть незначні відхилення можуть швидко впливати на фізіологічний стан рослин і продуктивність культур.

Система автоматизованого управління функціонує за принципом зворотного зв'язку. Отримані від датчиків дані передаються до центрального контролера або комп'ютерної системи управління, яка аналізує інформацію та коригує роботу технологічного обладнання. Таким чином забезпечується підтримання оптимальних умов вирощування без постійного втручання оператора. Наприклад, при підвищенні температури автоматично активуються системи вентиляції, затінення або охолодження, а при зниженні вологості — системи туманоутворення чи додаткового поливу [42].

Важливим аспектом автоматизації є підтримання оптимальних параметрів середовища для конкретних культур. Для салатних рослин рекомендований температурний режим у більшості безґрунтових систем становить 18–25 °С, а відносна вологість повітря – 45–80 %. Підтримання стабільного мікроклімату дозволяє уникати фізіологічного стресу рослин, знижує ризик розвитку грибкових захворювань та забезпечує ефективніше засвоєння елементів живлення. Особливо важливим є контроль концентрації

вуглекислого газу на рівні приблизно 400–1000 ppm, що сприяє оптимізації процесів фотосинтезу та підвищенню продуктивності рослин.

Однією з найважливіших складових цифровізації тепличного виробництва є автоматизована фертигація — система одночасного подавання води та поживних речовин. У безґрунтових технологіях саме фертигація визначає ефективність живлення рослин, оскільки субстрат або водне середовище не мають значного буферного потенціалу, характерного для природного ґрунту. Комп'ютеризовані системи дозування дозволяють підтримувати необхідні концентрації макро- та мікроелементів залежно від культури, фази розвитку рослин, температурного режиму та інтенсивності освітлення.

Для салатних культур особливо важливим є контроль електропровідності (ЕС) та кислотності (pH) живильного розчину. Оптимальні значення pH у більшості гідропонних систем становлять 5,5–6,5, що забезпечує максимальну доступність елементів живлення. При відхиленні pH знижується засвоєння окремих елементів, зокрема кальцію, магнію, фосфору та мікроелементів. Оптимальний рівень ЕС для салату зазвичай знаходиться у межах 1,2–2,0 mS/см залежно від сорту та стадії росту. В окремих системах вирощування допустимі значення ЕС можуть становити 1,5–2,5 mS/см. Підвищення електропровідності свідчить про надмірну концентрацію солей і може викликати осмотичний стрес у рослин.

Сучасні системи фертигації здатні автоматично регулювати дозування добрив шляхом інжекції концентрованих маточних розчинів у поливну воду. Для цього використовуються дозувальні насоси, змішувальні вузли та програмовані контролери. Автоматизація дозволяє уникати перевитрат води й добрив, забезпечує рівномірність живлення рослин та мінімізує антропогенне навантаження на довкілля.

У тепличних комплексах датчики, насоси, клапани, системи освітлення та клімат-контролю інтегруються у єдину цифрову мережу. Це дозволяє здійснювати централізоване управління всіма виробничими процесами через

комп'ютер або мобільний пристрій. Оператор може в режимі реального часу контролювати параметри мікроклімату, отримувати повідомлення про критичні відхилення та дистанційно змінювати налаштування систем.

Для ефективної роботи безґрунтових систем необхідний також постійний контроль технічного стану обладнання. У сучасних тепличних комплексах здійснюється регулярний моніторинг роботи насосів, систем аерації, трубопроводів та резервуарів для живильного розчину. Автоматизовані системи здатні оперативно виявляти витoki, засмічення або порушення циркуляції розчину, що дозволяє мінімізувати ризики пошкодження кореневої системи рослин та уникати втрат урожаю. Особливо важливим є забезпечення безперебійного електроживлення, оскільки гідропонні та аеропонні системи значною мірою залежать від постійної роботи насосів, систем циркуляції та аерації [43].

Особливого розвитку набувають технології прогнозної аналітики та штучного інтелекту. На основі накопичених даних системи аналізують закономірності росту рослин, споживання води та поживних речовин, вплив погодних умов і продуктивність культур. Використання алгоритмів машинного навчання дозволяє прогнозувати ризики виникнення стресових ситуацій, дефіциту елементів живлення або розвитку захворювань ще до появи видимих симптомів.

Сучасні системи контрольованого середовища (Controlled Environment Farming) поєднують автоматизацію, сенсорні технології та елементи штучного інтелекту для управління температурою, вологістю, освітленням і концентрацією CO₂. Такі технології забезпечують можливість цілорічного виробництва продукції незалежно від зовнішніх кліматичних умов. Водночас функціонування подібних систем потребує значних енергетичних ресурсів та наявності резервних джерел живлення, а також високого рівня технічного обслуговування й постійного калібрування обладнання.

У сучасних тепличних комплексах широко застосовуються автоматизовані системи освітлення. Світлодіодні LED-модулі можуть змінювати

інтенсивність та спектральний склад випромінювання залежно від фази розвитку рослин і рівня природного освітлення. Автоматичне регулювання фотоперіоду дозволяє підтримувати стабільний фотосинтетичний режим та забезпечувати цілорічне виробництво продукції незалежно від сезонних змін тривалості дня. Для листових культур тривалість освітлення зазвичай становить 12–16 годин на добу, що забезпечує ефективне формування вегетативної маси рослин.

Окремим напрямом автоматизації є роботизація виробничих процесів. У високотехнологічних теплицях використовуються автоматичні системи висіву, транспортування касет, пересаджування розсади, пакування та сортування продукції. Роботизовані комплекси дозволяють зменшити трудові витрати, підвищити точність виконання технологічних операцій та мінімізувати ризик механічного пошкодження рослин.

Для оцінки стану рослин дедалі активніше застосовуються технології комп'ютерного зору та дистанційного моніторингу. Камери високої роздільної здатності, мультиспектральні сенсори та тепловізори дають змогу аналізувати колір листків, площу листової поверхні, інтенсивність транспірації та ознаки фізіологічного стресу. На основі отриманих зображень програмне забезпечення може автоматично виявляти симптоми хлорозу, дефіциту елементів живлення, водного стресу чи ураження патогенами.

Автоматизація безґрунтового вирощування має важливе екологічне значення. Завдяки точному дозуванню ресурсів суттєво зменшується споживання води та мінеральних добрив. У системах із рециркуляцією живильного розчину рівень використання води може бути на 70–90 % ефективнішим порівняно з традиційним ґрунтовим землеробством. Одночасно зменшується ризик забруднення навколишнього середовища нітратами та фосфатами.

Практика застосування автоматизованих безґрунтових технологій демонструє суттєве підвищення продуктивності культур. Дослідження свідчать, що використання безґрунтових систем сприяє збільшенню площі листової поверхні, біомаси кореневої системи та загальної врожайності рослин порівняно

з традиційним ґрунтовим вирощуванням. Це пояснюється точнішим контролем умов живлення, водозабезпечення та параметрів мікроклімату.

Цифровізація тепличного виробництва також сприяє підвищенню біобезпеки агроєкосистем. Автоматизовані системи контролю дозволяють швидко виявляти порушення параметрів середовища, які можуть сприяти розвитку патогенів або шкідників. Інтеграція кліматичних моделей, систем моніторингу та біологічного захисту рослин забезпечує формування більш стабільних і керованих агроєкосистем [44].

Автоматизація та цифровізація безґрунтового вирощування є основою сучасних інтенсивних тепличних технологій. Поєднання систем моніторингу, комп'ютерного управління, фертигації, роботизації та аналітики даних дозволяє підвищити врожайність, стабільність виробництва й екологічну ефективність агроєкосистем, забезпечуючи раціональне використання природних ресурсів та високу якість продукції.

1.9 Екологічна ефективність безґрунтових систем

Екологічна ефективність безґрунтових систем вирощування культур є одним із ключових чинників поширення сучасних тепличних технологій у світі. Використання гідропонних, аеропонних та субстратних систем дозволяє значно зменшити антропогенне навантаження на навколишнє середовище, оптимізувати використання природних ресурсів та забезпечити стабільне виробництво продукції незалежно від ґрунтово-кліматичних умов.

Однією з головних переваг безґрунтових технологій є суттєве скорочення споживання води. У традиційному землеробстві значна частина води втрачається внаслідок випаровування, інфільтрації та поверхневого стоку, тоді як у гідропонних системах вода циркулює у замкненому контурі та використовується повторно. За даними міжнародних досліджень, безґрунтові технології

дозволяють скоротити витрати води на 80–90 % порівняно з відкритим ґрунтом. Це особливо актуально в умовах глобального дефіциту водних ресурсів та посилення кліматичних змін [45].

Важливим аспектом екологічної ефективності є також раціональне використання земельних ресурсів. Безґрунтові системи можуть функціонувати в регіонах із деградованими, засоленими або непридатними для землеробства ґрунтами. Крім того, технології вертикального вирощування дають змогу значно підвищити продуктивність на одиницю площі за рахунок багаторядного розміщення рослин. Це дозволяє скоротити потребу у розширенні сільськогосподарських угідь та зменшити ризики вирубування лісів і деградації природних екосистем.

Безґрунтове вирощування також характеризується високою точністю внесення елементів живлення. Рослини отримують поживні речовини у вигляді збалансованих розчинів із контрольованими концентраціями макро- та мікроелементів. Це забезпечує ефективніше засвоєння поживних речовин і мінімізує втрати азоту та фосфору у довкілля. У традиційних системах вирощування надлишкове внесення добрив часто призводить до забруднення ґрунтових вод і розвитку евтрофікації водойм. У закритих гідропонних системах цей ризик значно нижчий завдяки рециркуляції поживного розчину та автоматичному контролю його параметрів.

Суттєвою перевагою є і зниження використання засобів захисту рослин. Контрольовані умови тепличного середовища, стерильність субстратів та відсутність контакту рослин із ґрунтовими патогенами дозволяють скоротити застосування фунгіцидів, гербіцидів та інсектицидів. Це позитивно впливає як на екологічний стан агроєкосистем, так і на безпечність готової продукції. У багатьох сучасних тепличних комплексах використовуються інтегровані системи біологічного захисту, що базуються на застосуванні ентомофагів та мікробіологічних препаратів.

Окрему роль безґрунтові технології відіграють у вдосконаленні логістики виробництва та постачання овочевої продукції. Завдяки можливості розміщення

тепличних комплексів поблизу великих міст і центрів споживання скорочується відстань транспортування продукції, що зменшує витрати пального та обсяги викидів вуглекислого газу. Вирощування культур у контрольованих умовах забезпечує стабільність постачання незалежно від сезонності та погодних факторів, що дозволяє ефективніше планувати логістичні процеси, графіки збору врожаю та поставки продукції до торговельних мереж. Крім того, продукція безґрунтового вирощування зазвичай має більш однорідну якість і кращу транспортабельність, що знижує втрати під час зберігання та перевезення. У системах вертикального фермерства та міського агровиробництва додатковою перевагою є скорочення так званого «харчового шляху» — відстані від виробника до споживача, що позитивно впливає як на свіжість продукції, так і на загальну екологічну ефективність аграрного виробництва [46].

Безґрунтові субстрати забезпечують більш кероване та точне виробництво рослинної продукції, дозволяючи адаптувати технології до умов дефіциту води, деградації ґрунтів та потреб інтенсивного овочівництва. Автори зазначають, що такі системи орієнтовані на максимально точне управління умовами вирощування. Це особливо важливо для сучасних тепличних господарств, які прагнуть поєднати високу продуктивність із принципами сталого розвитку.

Разом із перевагами безґрунтові технології мають і певні екологічні обмеження. Одним із головних недоліків є значне енергоспоживання, особливо у високотехнологічних тепличних комплексах із системами штучного освітлення, автоматичного клімат-контролю та цілорічного виробництва. Значні витрати електроенергії можуть збільшувати вуглецевий слід продукції, якщо енергія виробляється з викопного палива. Тому перспективним напрямом розвитку є інтеграція тепличних господарств із відновлюваними джерелами енергії — сонячними панелями, тепловими насосами, біогазовими установками та системами рекуперації тепла.

Окремою проблемою залишається утилізація використаних субстратів та поживних розчинів. Деякі субстрати, зокрема мінеральна вата, складно

переробляються та можуть створювати додаткове навантаження на довкілля. Саме тому сучасні дослідження спрямовані на пошук екологічно безпечних і біорозкладних субстратів, таких як кокосове волокно, деревна кора, органічні композити та перероблені матеріали.

Безґрунтові системи вирощування культур характеризуються високою екологічною ефективністю завдяки економії водних і земельних ресурсів, зменшенню хімічного навантаження на довкілля, підвищенню точності живлення рослин, удосконаленню логістичних процесів та можливості інтеграції у концепцію сталого сільського господарства. Водночас для забезпечення максимальної екологічної доцільності необхідним є подальше вдосконалення енергоефективності тепличних комплексів, розвиток систем рециркуляції ресурсів та впровадження екологічно безпечних субстратів [47].

2 УМОВИ І МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Науково-виробнича діяльність компанії Рійк Цваан

Компанія Рійк Цваан (Rijk Zwaan) є однією з провідних міжнародних селекційно-насінневих компаній у сфері овочівництва закритого та відкритого ґрунту, діяльність якої суттєво вплинула на розвиток сучасних технологій тепличного виробництва та безґрунтового вирощування овочевих культур. Підприємство було засноване у 1924 році в місті Роттердам (Нідерланди) Рійком Цвааном як невелика сімейна насіннева компанія, орієнтована на селекцію овочевих культур для місцевого ринку. Упродовж наступних десятиліть компанія поступово розширювала напрями своєї діяльності, перетворившись на одного з найбільших світових виробників насінневого матеріалу та розробників інноваційних агротехнологій.

У 2024 році компанія офіційно відзначила 100-річний ювілей своєї діяльності. На сучасному етапі розвитку Рійк Цваан функціонує більш ніж у 100 країнах світу та має понад 30 міжнародних дочірніх підприємств і регіональних представництв. Загальна чисельність працівників компанії перевищує 4 000 осіб, при цьому значна частина персоналу залучена до науково-дослідної діяльності у сфері селекції, біотехнологій та агроінженерії. Важливою особливістю компанії є її незалежна структура управління - більшість акцій залишається у власності родин засновників та працівників компанії, що забезпечує довгострокову орієнтацію на науковий розвиток і стабільність виробничої політики.

Основним напрямом діяльності компанії є селекція овочевих культур та створення високоякісного насінневого матеріалу для інтенсивних систем вирощування. На сьогодні компанія працює більш ніж із 30 видами овочевих

культур і пропонує понад 2000 сортів та гібридів для різних ґрунтово-кліматичних умов. Особливе місце у структурі виробництва займають салатні культури, томати, огірки, солодкий перець, шпинат, капустяні культури та інші овочі, які активно вирощуються у високотехнологічних тепличних комплексах.

Наукова діяльність Рійк Цваан базується на використанні сучасних селекційних підходів, молекулярної біології, цифрових систем моніторингу та технологій точного землеробства. Щороку компанія інвестує близько 30 % власного обороту у наукові дослідження та інноваційні розробки. Створення нового сорту або гібриду триває в середньому від 6 до 16 років і включає багаторівневі випробування щодо продуктивності, стійкості до хвороб, адаптивності до умов культивування та якості продукції.

Важливим напрямом діяльності компанії є розвиток технологій безґрунтового вирощування овочевих культур. Сучасні тенденції світового овочівництва характеризуються поступовим переходом від традиційного ґрунтового землеробства до контрольованих гідропонних систем, що забезпечують більш стабільні умови росту рослин, високу ресурсоефективність та можливість автоматизації виробничих процесів. У цьому контексті компанія виступає одним із ключових учасників формування концепції високотехнологічного тепличного виробництва [48].

Особлива увага компанії приділяється розвитку гідропонних систем із використанням мінераловатних та органічних субстратів, автоматизованих систем фертигації, рециркуляції поживних розчинів та цифрового моніторингу параметрів мікроклімату. У сучасних тепличних комплексах, які функціонують за технологічними підходами компанії, здійснюється постійний контроль температурного режиму, вологості повітря, рівня освітлення, концентрації вуглекислого газу, показників рН та електропровідності живильного середовища. Такі технології дозволяють забезпечувати оптимальні умови для росту рослин та мінімізувати втрати води й елементів живлення.

Значний вплив діяльності компанії простежується у формуванні сучасної концепції сталого тепличного виробництва. У безґрунтових системах

вирощування особливого значення набуває контрольованість кореневого середовища рослин та регуляція складу ризосферного мікробіому. На відміну від традиційних ґрунтових агроценозів, де мікробіологічне середовище формується природним шляхом та може містити значну кількість патогенних організмів, безґрунтові технології дозволяють використовувати стерильні або попередньо підготовлені субстрати із контрольованим мікробіологічним складом.

Завдяки цьому створюються передумови для інтеграції біологічних методів захисту рослин, використання мікроорганізмів-антагоністів та скорочення застосування хімічних засобів захисту. Такий підхід сприяє підвищенню екологічної безпечності продукції та мінімізації антропогенного навантаження на навколишнє середовище.

Окремим напрямом діяльності компанії є розвиток урбанізованого овочівництва та вертикальних ферм. В умовах глобальної урбанізації, зростання чисельності населення та обмеженості земельних ресурсів високотехнологічні безґрунтові системи розглядаються як перспективний інструмент забезпечення продовольчої безпеки. Використання багаторусних тепличних конструкцій та вертикальних систем вирощування дозволяє значно підвищити ефективність використання площі та локалізувати виробництво свіжої продукції безпосередньо у межах великих міських агломерацій.

Практичний досвід компанії у сфері автоматизації гідропонних систем, контролю ризосферного середовища та інтеграції біологічних методів захисту рослин є важливим підґрунтям для проведення досліджень щодо екологічної оцінки сталих безґрунтових систем вирощування овочевих культур [49].

2.2 Характеристика гідропонних систем компанії Рійк Цваан

У межах формування науково-методичної бази досліджень було проведено ознайомлення із сучасними технологіями безґрунтового вирощування

овочевих культур у Центрі випробування гідропонних систем (Trial Centre Hydroponics) компанії Rijk Zwaan, розташованому у місті Дінтелорд. Відвідування відбулося під час міжнародного спеціалізованого заходу Гідропонні демонстраційні дні (Hydro Demo Days), який щорічно організовується для представників тепличної галузі, агрономів, дослідників та виробників овочевої продукції із різних країн світу.

На рисунку 2.1 зображено гідропонне вирощування салату в демонстраційному центрі компанії Rijk Zwaan.



Рисунок 2.1 - Гідропонне вирощування салату в демонстраційному центрі компанії Rijk Zwaan.

Демонстраційний центр компанії є високотехнологічним комплексом, у якому здійснюється тестування нових сортів листових овочевих культур, відпрацювання технологічних схем вирощування та оцінка ефективності сучасних систем керування тепличним виробництвом. Основну увагу під час проведення заходу було приділено інтенсивним безґрунтовим технологіям вирощування салатних культур у контрольованих умовах мікроклімату.

У ході ознайомлення з виробничими зонами центру було досліджено особливості функціонування гідропонних систем із використанням

мінераловатних матів та органічних субстратів на основі кокосового волокна. Вирощування рослин здійснювалось у жолобових системах із краплинним подаванням поживного розчину, де кожна технологічна операція контролювалась автоматизованими системами управління. У тепличних блоках підтримувались стабільні параметри температури, вологості повітря, інтенсивності освітлення та концентрації вуглекислого газу відповідно до фізіологічних потреб культури на різних етапах росту і розвитку [50].

Особливий інтерес становили системи автоматичного приготування та рециркуляції поживних розчинів. Під час демонстрації було представлено принципи функціонування вузлів фертигації, у яких здійснюється автоматичне дозування макро- та мікроелементів, контроль показників рН і електропровідності живильного середовища, а також повторне використання дренажних вод після їх очищення та знезараження. Такий підхід дозволяє значно зменшити витрати водних ресурсів та мінімізувати потрапляння надлишкових сполук азоту і фосфору у навколишнє середовище.

Під час відвідування тепличного комплексу значну увагу було приділено фітосанітарному контролю та забезпеченню біологічної безпеки виробництва. У сучасних гідропонних системах компанії Рйк Цваан використовується концепція максимально контрольованого кореневого середовища, що базується на застосуванні стерильних або попередньо підготовлених субстратів. На відміну від ґрунтових агроценозів, у яких мікробіологічне середовище формується природним шляхом і може містити значну кількість патогенних організмів, у безґрунтових системах забезпечується можливість регуляції складу ризосферної мікрофлори [51].

Під час презентації технологій було продемонстровано підходи до інтеграції біологічних методів захисту рослин, зокрема застосування мікроорганізмів-антагоністів та біологічно активних препаратів для профілактики розвитку патогенів у прикореневій зоні. Було відзначено, що підтримання багаторівневої стерильності виробничого середовища дозволяє

мінімізувати використання хімічних засобів захисту рослин та підвищити екологічну безпечність продукції.

Окремо в межах демонстраційного центру були представлені сучасні сорти салатів лінійки Саланова (Salanova), які адаптовані до інтенсивного гідропонного вирощування. Особливу увагу було приділено сортам Екзект (Exect) та Експідишн (Expidition), які характеризуються високою однорідністю листової маси, інтенсивним ростом та придатністю до механізованої переробки. Представники компанії акцентували увагу на тому, що дані сорти мають високі смакові якості та забезпечують формування великої кількості дрібних однорідних листків після зрізування, що є важливим для виробництва салатних сумішей [52].

У ході ознайомлення із технологічними рішеннями також було розглянуто концепції сталого тепличного виробництва та урбанізованого овочівництва. Представлені технології орієнтовані на скорочення логістичних витрат, зменшення використання природних ресурсів та локалізацію виробництва свіжої продукції поблизу великих міських агломерацій. Значна увага приділяється розвитку вертикальних ферм та багатоярусних систем вирощування, які дозволяють ефективно використовувати обмежені площі в умовах високої щільності населення.

Під час проведення Hydro Demo Days також було представлено екологічні підходи до оптимізації азотного живлення салатних культур, спрямовані на зниження накопичення нітратів у продукції та зменшення екологічного навантаження на агроєкосистеми. Компанія активно впроваджує концепції ресурсоефективного виробництва, що поєднують високу продуктивність із екологічною безпечністю технологій.

Отримані під час відвідування демонстраційного центру теоретичні та практичні матеріали стали основою для формування схеми власних експериментальних досліджень, які надалі проводилися у лабораторних умовах Дніпровського державного аграрно-економічного університету. На основі аналізу представлених технологій було сформовано підходи до оцінки впливу

різних типів субстратів на формування мікробіому кореневої зони салатних культур, визначення екологічних переваг безґрунтових систем та оцінки перспектив використання біологічних методів контролю фітопатогенних організмів у гідропонному виробництві.

2.3 Умови проведення досліджень

Дослідження виконувалися упродовж 2025–2026 рр. на базі лабораторії кафедри екології Дніпровського державного аграрно-економічного університету. Теоретичним підґрунтям для формування схеми досліджень стали результати ознайомлення з сучасними високотехнологічними системами гідропонного вирощування салатних культур у демонстраційному центрі компанії Rijk Zwaan (м. Дінтелoord, Нідерланди) під час проведення заходу Hydroponic Demo Days.

Дослідження проводилися в лабораторних умовах із дотриманням вимог охорони праці, санітарно-гігієнічних норм та правил безпеки під час виконання мікробіологічних і агробіологічних робіт. Проведення експериментів здійснювалося у спеціалізованому лабораторному приміщенні, обладнаному системами вентиляції, штучного освітлення, контролю температури та вологості повітря. Під час організації дослідних робіт враховувалися вимоги ДСанПіН 2.2.4-171-10 «Гігієнічні вимоги до мікроклімату виробничих приміщень», а також положення НПАОП щодо безпечної роботи у лабораторіях та під час виконання мікробіологічних досліджень [53].

Об'єктом дослідження були безґрунтові системи вирощування салату із використанням інертних субстратів та біологічного препарату Хетомік. Предметом дослідження виступали екологічні та мікробіологічні особливості функціонування безґрунтових систем вирощування за різних типів субстратів і умов рециркуляції поживного розчину.

У дослідженнях використовували сорти салату лінійки Salanova селекції компанії Rijk Zwaan:

- Eхесl RZ;
- Eхpidition RZ.

Для вирощування рослин застосовували два типи субстратів:

- мінеральна вата;
- кокосовий субстрат.

У всі варіанти досліду вносили біологічний препарат Хетомік на основі грибів-антагоністів роду *Trichoderma*.

Схема досліду включала чотири варіанти:

1. Eхесl RZ + мінеральна вата + Хетомік;
2. Eхесl RZ + кокосовий субстрат + Хетомік;
3. Eхpidition RZ + мінеральна вата + Хетомік;
4. Eхpidition RZ + кокосовий субстрат + Хетомік.

Дослід проводили у триразовій повторності. Рослини вирощували в умовах контрольованого мікроклімату із підтриманням температури повітря на рівні 20–22 °C у денний період та 16–18 °C у нічний. Відносна вологість повітря становила 65–75 %, а повітрообмін забезпечувався припливно-витяжною вентиляцією. Освітлення забезпечувалося комбінованою системою природного та LED-освітлення з фотоперіодом 14–16 годин. Інтенсивність освітлення підтримувала оптимальний рівень фотосинтетичної активності та формування вегетативної маси рослин.

Живлення рослин здійснювали методом фертигації із використанням рециркуляційного поживного розчину. Поживний розчин готували відповідно до потреб салатних культур у макро- та мікроелементах. У процесі вирощування регулярно контролювали показники рН та електропровідності (ЕС) розчину, оскільки їх стабільність безпосередньо впливає на інтенсивність росту рослин і формування кореневої мікробіоти. Оптимальні значення рН підтримували в межах 5,5–6,5, а рівень електропровідності — у межах 1,2–2,0 mS/см. Для оцінки

безпеки рециркуляції води проводили мікробіологічний аналіз поживного розчину після різних способів знезараження, зокрема ультрафіолетового опромінення.

Перед початком досліджень субстрати та елементи гідропонної системи проходили санітарну обробку з метою мінімізації ризику мікробного забруднення. Під час проведення мікробіологічних досліджень особлива увага приділялася дотриманню правил асептики та біологічної безпеки. Відбір зразків ризосферного середовища, поживних розчинів та рослинного матеріалу здійснювали стерильними інструментами із використанням одноразових рукавичок та лабораторного посуду, що попередньо проходив стерилізацію. Для знезараження поверхонь використовували дезінфекційні засоби відповідно до санітарних вимог роботи з мікроорганізмами.

Мікробіологічні дослідження виконувалися відповідно до загальноприйнятих методик культивування мікроорганізмів на живильних середовищах. Під час роботи використовували стерильні чашки Петрі, піпетки, пробірки та лабораторний інструментарій. Підготовка поживних середовищ і стерилізація обладнання проводилися із застосуванням термічної обробки та автоклавування. Роботи з мікроорганізмами виконувалися у чистій робочій зоні з обмеженням стороннього доступу до лабораторії.

У ході досліджень визначали:

- динаміку ростових процесів рослин;
- біометричні показники салату;
- масу надземної та кореневої частини;
- мікробіологічний стан субстратів і поживного розчину;
- показники електропровідності та pH;
- ефективність біологічного препарату Хетомік;
- вплив способів знезараження рециркуляційної води на фітосанітарний стан системи.

Під час виконання досліджень керувалися чинними нормативними документами та стандартами, зокрема: ДСТУ 16075-1:2021 «Настанови щодо

використання очищених стічних вод для зрошення», ДСТУ 7949:2015 «Якість води. Визначення рН», ДСТУ 7888:2003 «Якість води. Визначення електропровідності», ДСТУ 4833-1:2014 «Мікробіологія харчового ланцюга. Горизонтальний метод підрахунку мікроорганізмів», а також методичними рекомендаціями щодо проведення агрохімічних і мікробіологічних досліджень у тепличних умовах [54].

У процесі проведення досліджень працівники лабораторії дотримувалися вимог охорони праці та використовували засоби індивідуального захисту: лабораторні халати, рукавички та захисні маски. До виконання робіт допускалися особи, які пройшли інструктаж з техніки безпеки та ознайомилися з правилами роботи у лабораторії. Особлива увага приділялася безпечному поводженню з електрообладнанням, системами освітлення, нагрівальними приладами та лабораторним скляним посудом.

Для запобігання біологічному забрудненню та поширенню мікроорганізмів усі відходи мікробіологічних досліджень підлягали знезараженню перед утилізацією. Використані поживні середовища, рослинні залишки та одноразові матеріали збирали у спеціальні контейнери та піддавали дезінфекції відповідно до санітарно-епідеміологічних вимог [55].

Окрему увагу приділяли оцінці екологічної безпечності використаних субстратів та можливості їх подальшої утилізації після завершення циклу вирощування. Для цього аналізували потенційний вуглецевий слід субстратів, їх стабільність та перспективи повторного використання у тепличному виробництві.

Отримані результати досліджень фіксувалися шляхом проведення морфометричних вимірювань рослин, оцінки стану кореневої системи, визначення показників росту та аналізу мікробіологічних характеристик ризосферного середовища. Спостереження проводилися систематично протягом усього періоду вирощування салату. Отримані експериментальні дані обробляли методами варіаційної статистики з визначенням середніх значень показників та їх достовірності.

3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННІ

3.1 Динаміка ростових процесів культур за використання різних субстратів

Одним із ключових критеріїв екологічної та технологічної ефективності безґрунтових систем вирощування є інтенсивність ростових процесів рослин. Саме динаміка формування вегетативної маси дозволяє оцінити адаптивність культури до умов контрольованого середовища, ефективність субстрату та вплив біологічного супроводу на фізіологічний стан рослин.

У таблиці 3.1 наведено дані про динаміку формування біомаси салатних культур залежно від типу субстрату.

Таблиця 3.1 - Динаміка формування біомаси салатних культур залежно від типу субстрату

Варіант досліджу	Висота рослин, см	Кількість листків, шт.	Маса рослини, г	Приріст біомаси, %
Екзект + мінеральна вата	18,4 ± 0,6	24,1 ± 1,2	156,3 ± 5,4	100
Екзект + кокосовий субстрат	20,1 ± 0,5	27,8 ± 1,1	171,5 ± 4,8	109,7
Експідишн + мінеральна вата	19,2 ± 0,7	25,4 ± 1,0	162,7 ± 5,1	104,1
Експідишн + кокосовий субстрат	21,3 ± 0,4	29,1 ± 0,9	179,8 ± 4,5	115,0

У дослідженні було проведено оцінку ростових процесів салатних культур лінійки Саланова – Екзект та Експідишн - за вирощування на двох типах

субстратів: мінеральній ваті та кокосовому субстраті. У всіх варіантах застосовували біологічний препарат «Хетомік», який містить антагоністичні мікроорганізми та культуральні метаболіти, здатні стабілізувати мікробіом кореневої зони й пригнічувати розвиток фітопатогенів.

Контрольованість безґрунтової системи забезпечувала можливість підтримання стабільних параметрів живлення, вологості та аерації кореневої зони. На відміну від ґрунтових систем, де мікробіом формується природним шляхом і часто характеризується високою конкуренцією між мікроорганізмами, у безґрунтових технологіях коренева мікрофлора формується керовано. Це дозволяє мінімізувати ризики розвитку патогенних організмів та зменшити потребу у використанні хімічних засобів захисту рослин.

У таблиці 3.2 наведено дані про динаміку ростових процесів салатних культур за використання різних субстратів та біологічного препарату «Хетомік».

Таблиця 3.2 - Динаміка ростових процесів салатних культур за використання різних субстратів та біологічного препарату «Хетомік» (60 діб вирощування).

Показник	Екзект Мінеральна вата (Варіант 1)	Екзект Кокосовий субстрат (Варіант 2)	Експідишн Мінеральна вата (Варіант 3)	Експідишн Кокосовий субстрат (Варіант 4)
Приріст біомаси, % (відносно контролю)	+6,4 %	+9,7 %	+4,1 %	+15,0 %
Середнє значення	156,3	171,5	162,7	179,8
Стандартна помилка	5,42	4,84	5,07	4,50
Медіана	155,0	170,0	160,0	178,0
Мода	150	168	160	175

Стандартне відхилення	17,18	15,34	16,06	14,26
Дисперсія вибірки	295,13	235,17	257,92	203,31
Ексцес	-0,15	-0,28	-0,12	-0,33
Асиметричність	0,18	0,12	0,10	-0,02
Мінімум	125	140	130	150
Максимум	190	205	195	210
Інтервал	65	65	65	60
Сума	4690	5145	4880	5395
Кількість спостережень (n)	30	30	30	30
Найбільше значення	190	205	195	210
Найменше значення	125	140	130	150
Довірчий інтервал (95,0 %)	11,26	10,04	10,52	9,33

Отримані результати свідчать, що використання кокосового субстрату забезпечувало інтенсивніший ріст салатних культур порівняно з мінеральною ватою. Найвищий приріст біомаси спостерігся у варіанті Експідишн на кокосовому субстраті (+15,0 %), де також зафіксовано найбільше середнє значення маси рослин - 179,8 г. Загалом кокосовий субстрат сприяв стабільнішому розвитку рослин та кращому накопиченню біомаси в умовах безґрунтового вирощування.

У таблиці 3.3 наведено дані про динаміку приросту висоти салатних культур за використання різних субстратів та препарату «Хетомік».

Таблиця 3.3 – Динаміка приросту висоти салатних культур за використання різних субстратів та препарату «Хетомік» (60 діб вирощування)

Показник	Екзект Мінеральна вата (Варіант 1)	Екзект Кокосовий субстрат (Варіант 2)	Експідишн Мінеральна вата (Варіант 3)	Експідишн Кокосовий субстрат (Варіант 4)
Приріст висоти, % (відносно Варіанту 1)	+8,0 %	+13,0 %	+4,6 %	+16,8 %
Середнє значення	52,8	59,8	55,3	61,7
Стандартна помилка	0,58	1,18	1,20	1,05
Медіана	53	60	56	62
Мода	53	67	57	63
Стандартне відхилення	7,18	8,91	9,60	8,37
Дисперсія вибірки	51,50	79,30	92,13	70,12
Ексцес	-0,16	-0,62	1,58	-0,11
Асиметричність	0,20	-0,02	0,44	0,08
Інтервал	36	40	55	44
Мінімум	35	41	34	42
Максимум	71	81	89	86
Сума	8187	3409	3537	3702
Кількість спостережень (n)	155	57	64	60
Найбільше значення	71	81	89	86

Найменше значення	35	41	34	42
Довірчий інтервал (95,0 %)	1,14	2,36	2,40	2,11

Результати дослідження показали, що найінтенсивніший приріст висоти рослин спостерігався у варіанті Експідишн на кокосовому субстраті (+16,8 %), де середня висота рослин становила 61,7 см. Загалом використання кокосового субстрату сприяло активнішому росту салатних культур порівняно з мінеральною ватою. Отримані показники свідчать про ефективність безгрунтових систем вирощування та позитивний вплив препарату «Хетомік» на розвиток рослин у контрольованих умовах теплиці.

На рисунку 3.1 наведено дані про динаміку біометричних показників салатних культур за використання препарату «Хетомік»

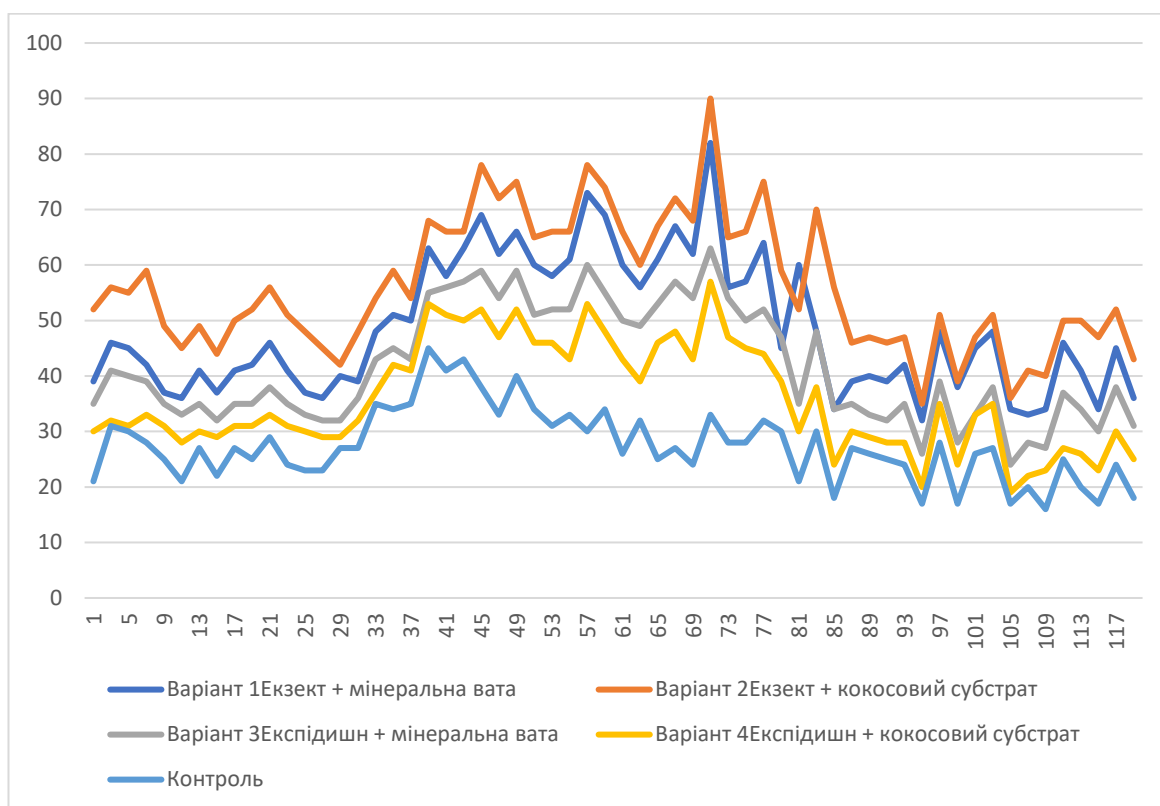


Рисунок 3.1 - Динаміка біометричних показників салатних культур за використання препарату «Хетомік».

Представлені дані демонструють динаміку росту салатних культур лінійки Саланова у безґрунтових системах вирощування за використання різних субстратів та біологічного препарату «Хетомік». Найвищі показники висоти рослин спостерігалися у варіантах із використанням кокосового субстрату, особливо для сорту Експідишн. У контрольному варіанті без застосування препарату та оптимізованих субстратів ріст рослин був значно нижчим. Отримані результати свідчать про позитивний вплив кокосового субстрату та препарату «Хетомік» на інтенсивність ростових процесів салатних культур у контрольованих умовах теплиці.

3.2 Формування контрольованого мікробіому

Однією з ключових переваг безґрунтових систем вирощування є можливість цілеспрямованого формування мікробіому ризосфери та підтримання стабільного санітарно-біологічного стану кореневої зони рослин. Використання стерильних субстратів у поєднанні з біологічними препаратами дозволяє контролювати склад мікробного угруповання, стимулювати розвиток корисної мікрофлори та обмежувати поширення небажаних мікроорганізмів. Для оцінки впливу препарату «Хетомік» на формування ризосферного мікробіому салатних культур було проведено аналіз динаміки розвитку мікроорганізмів, структури мікробного комплексу та особливостей колонізації кореневої зони в різних субстратах.

На рисунку 3.2 наведено дані про динаміку формування мікробіому ризосфери салатних культур за використання препарату «Хетомік»

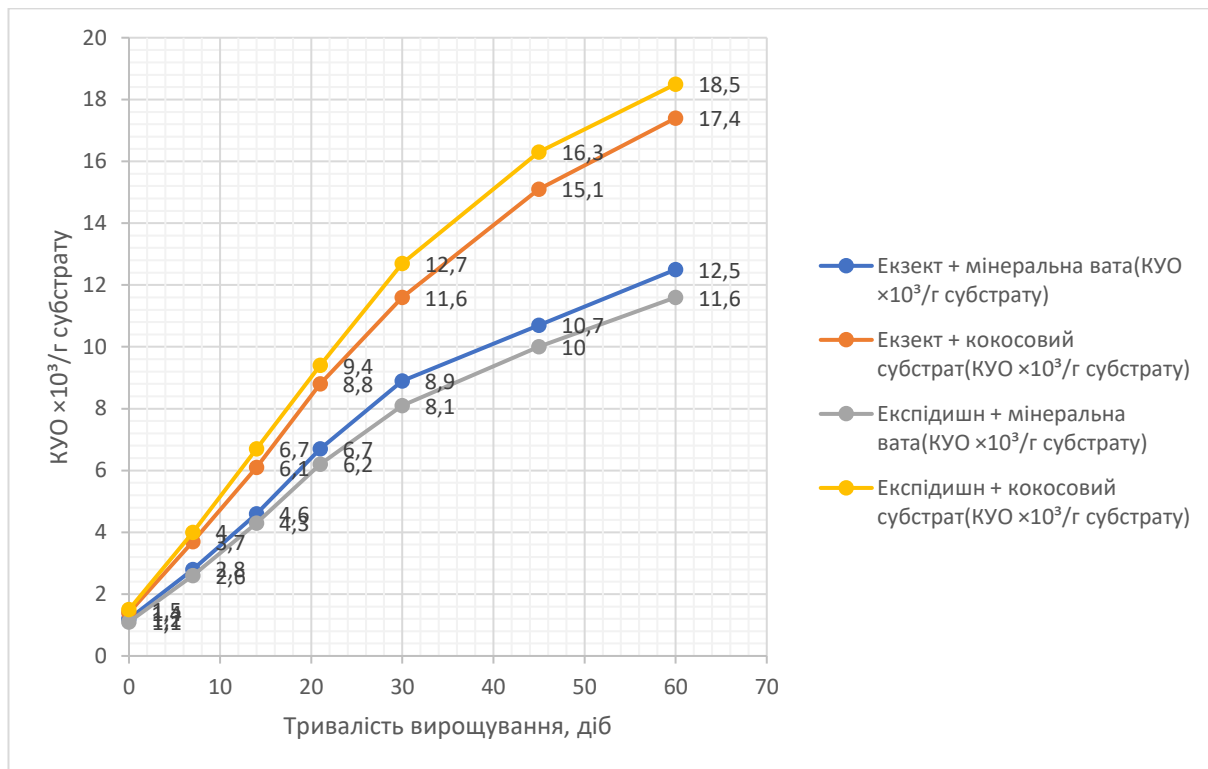


Рисунок 3.2 - Динаміка формування мікробіому ризосфери салатних культур за використання препарату «Хетомік»

Результати дослідження свідчать про поступове формування стабільного мікробіому ризосфери салатних культур упродовж усього періоду вирощування. Встановлено, що застосування препарату «Хетомік» сприяло активному зростанню чисельності мікроорганізмів у прикореневій зоні рослин незалежно від типу субстрату.

Найвищі показники мікробного навантаження були зафіксовані у варіантах із використанням кокосового субстрату, зокрема у сорту Експідишн, де на 60 добу чисельність мікроорганізмів досягла $18,5 \times 10^3$ КУО/г субстрату. У варіантах із мінеральною ватою формування мікробіому також відбувалося стабільно, проте інтенсивність розвитку мікробіоти була дещо нижчою.

На рисунку 3.3 наведено дані про вплив біопрепарату на структуру мікробіому кореневої зони салатних культур

3.3 - Вплив біопрепарату на структуру мікробіому кореневої зони салатних культур

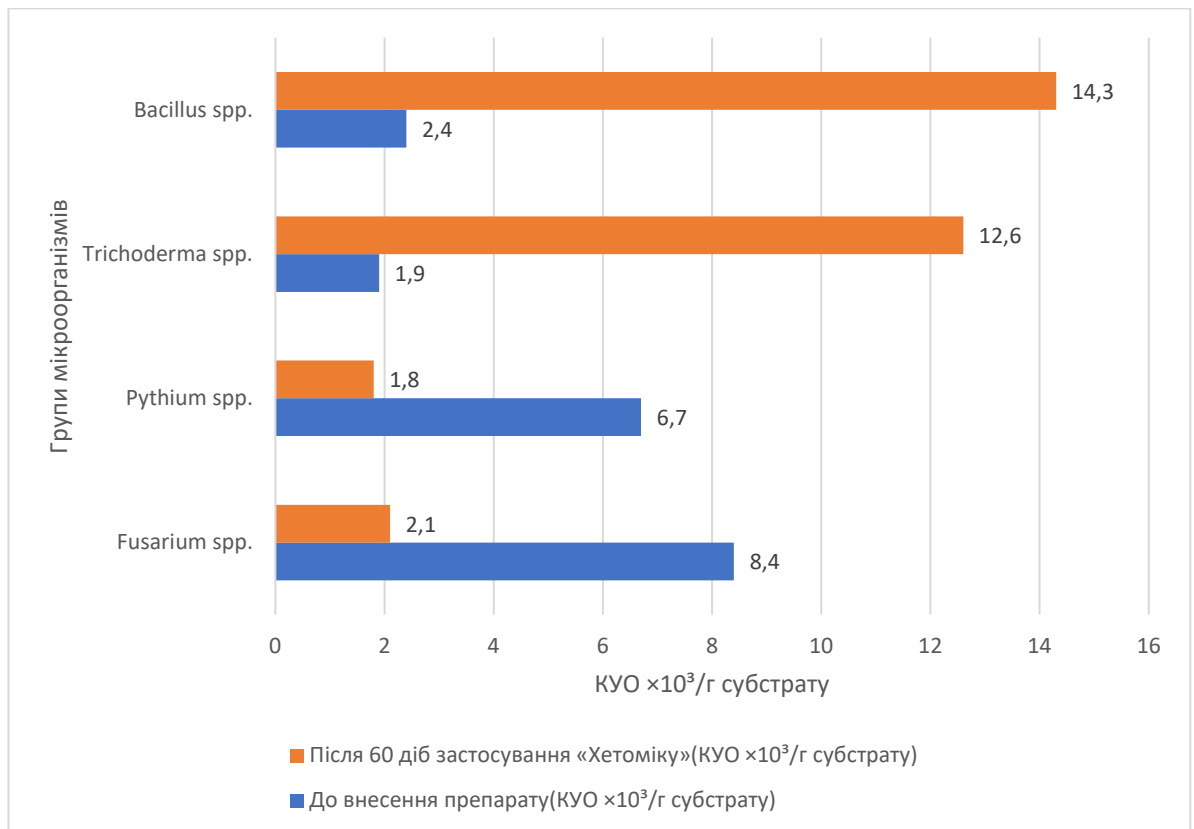


Рисунок 3.3 - Вплив біопрепарату на структуру мікробіому кореневої зони салатних культур

Отримані результати свідчать про суттєвий вплив препарату «Хетомік» на структуру мікробіому кореневої зони салатних культур. Після 60 діб вирощування спостерігалось значне зниження чисельності фітопатогенних мікроорганізмів, зокрема *Fusarium* spp. та *Pythium* spp., кількість яких зменшилася на 75,0 % та 73,1 % відповідно.

Водночас відмічено активний розвиток антагоністичної мікрофлори. Чисельність *Trichoderma* spp. зросла більш ніж у 5 разів, а *Bacillus* spp. — майже у 6 разів порівняно з початковими показниками. Це підтверджує ефективність препарату «Хетомік» у формуванні стабільного контрольованого мікробіому та пригніченні розвитку патогенних організмів у безґрунтових системах вирощування.

На рисунку 3.4 наведено дані про порівняння мікробіологічної чистоти різних систем вирощування салатних культур

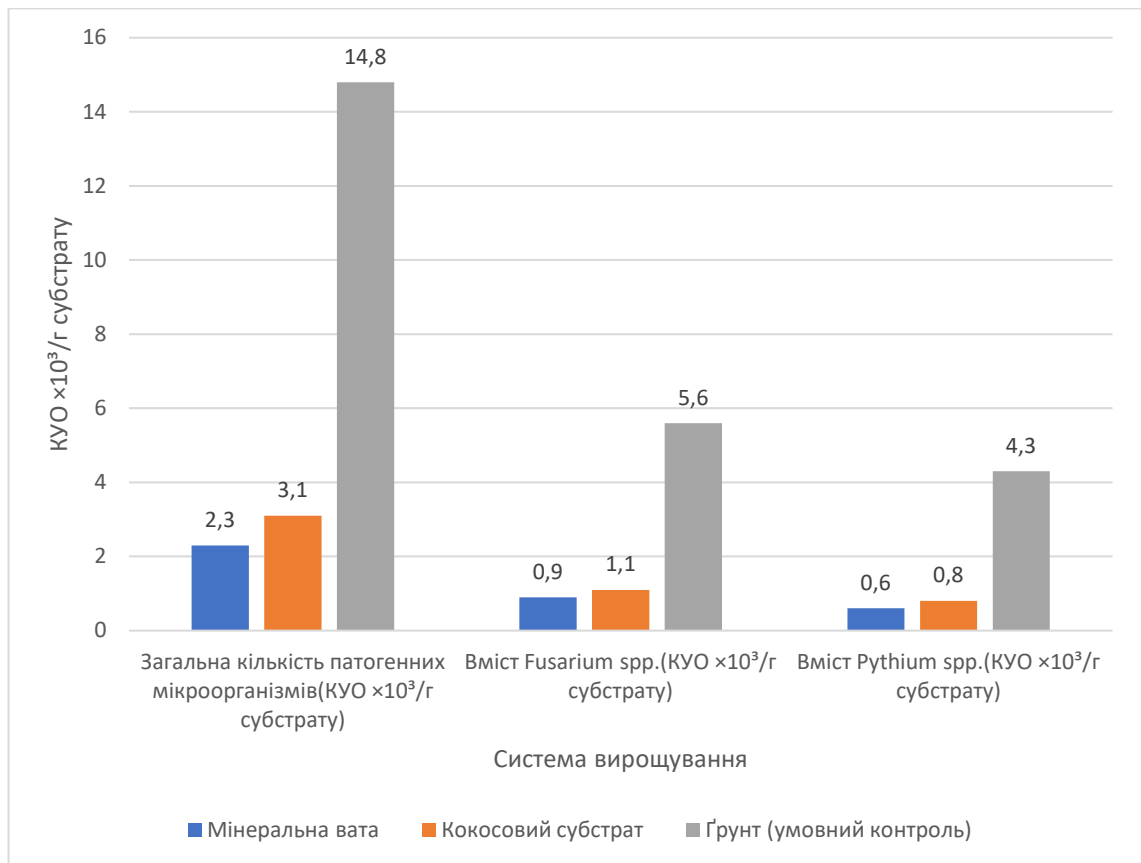


Рисунок 3.4 - Порівняння мікробіологічної чистоти різних систем вирощування салатних культур

Результати дослідження показали, що безґрунтові системи вирощування характеризуються значно вищим рівнем мікробіологічної стерильності порівняно з відкритим ґрунтом. Найменшу кількість патогенних мікроорганізмів було виявлено у мінеральній ваті, тоді як кокосовий субстрат також демонстрував високий рівень мікробіологічної чистоти. У ґрунтовому варіанті кількість фітопатогенів була у декілька разів вищою, що свідчить про складність контролю природного мікробіому. Отримані результати підтверджують, що використання стерильних субстратів у поєднанні з біологічними препаратами забезпечує формування контрольованого мікробіому та знижує ризик розвитку патогенних організмів у тепличних агроценозах.

На рисунку 3.5 наведено дані про інтенсивність колонізації кореневої зони антагоністичними мікроорганізмами

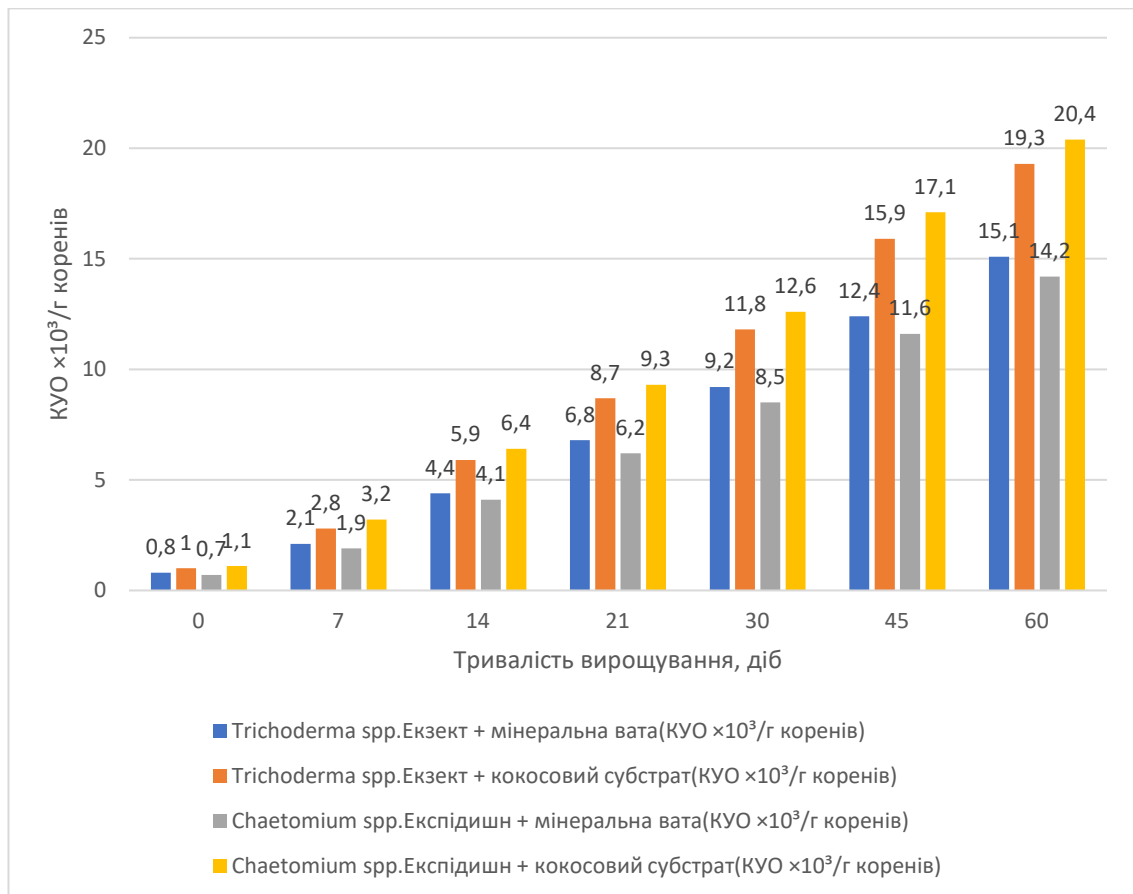


Рисунок 3.5 - Інтенсивність колонізації кореневої зони антагоністичними мікроорганізмами

Отримані результати свідчать про поступове та стабільне заселення кореневої системи салатних культур антагоністичними мікроорганізмами впродовж усього періоду вирощування. Найвищу інтенсивність колонізації було зафіксовано у варіантах із використанням кокосового субстрату, де чисельність *Trichoderma spp.* та *Chaetomium spp.* на 60 добу досягала 19,3 та 20,4 × 10³ КУО/г коренів відповідно.

У варіантах із мінеральною ватою розвиток антагоністичної мікрофлори також відбувався активно, проте показники були дещо нижчими. Це свідчить про те, що кокосовий субстрат створює більш сприятливі умови для формування стабільного мікробіому ризосфери.

Загалом результати підтверджують ефективність препарату «Хетомік» у формуванні контрольованого мікробного середовища та біологічному захисті кореневої системи салатних культур у безґрунтових системах вирощування.

Одним із важливих показників санітарно-біологічного стану ризосфери є чисельність та динаміка розвитку корисних мікроорганізмів, які беруть участь у процесах мінерального живлення рослин, стимуляції росту та формуванні стабільного мікробного комплексу кореневої зони. У безґрунтових системах вирощування застосування біологічних препаратів дає змогу цілеспрямовано формувати мікробіом ризосфери та підтримувати його функціональну активність протягом усього періоду вегетації. Для оцінки впливу препарату Хетомік на розвиток мікроорганізмів у кореневій зоні салату було проаналізовано зміни їх чисельності на різних фенологічних етапах розвитку культури.

На рисунку 3.6 наведено дані про динаміку чисельності мікроорганізмів у ризосфері салату за використання біологічного препарату Хетомік, КУО $\times 10^5$

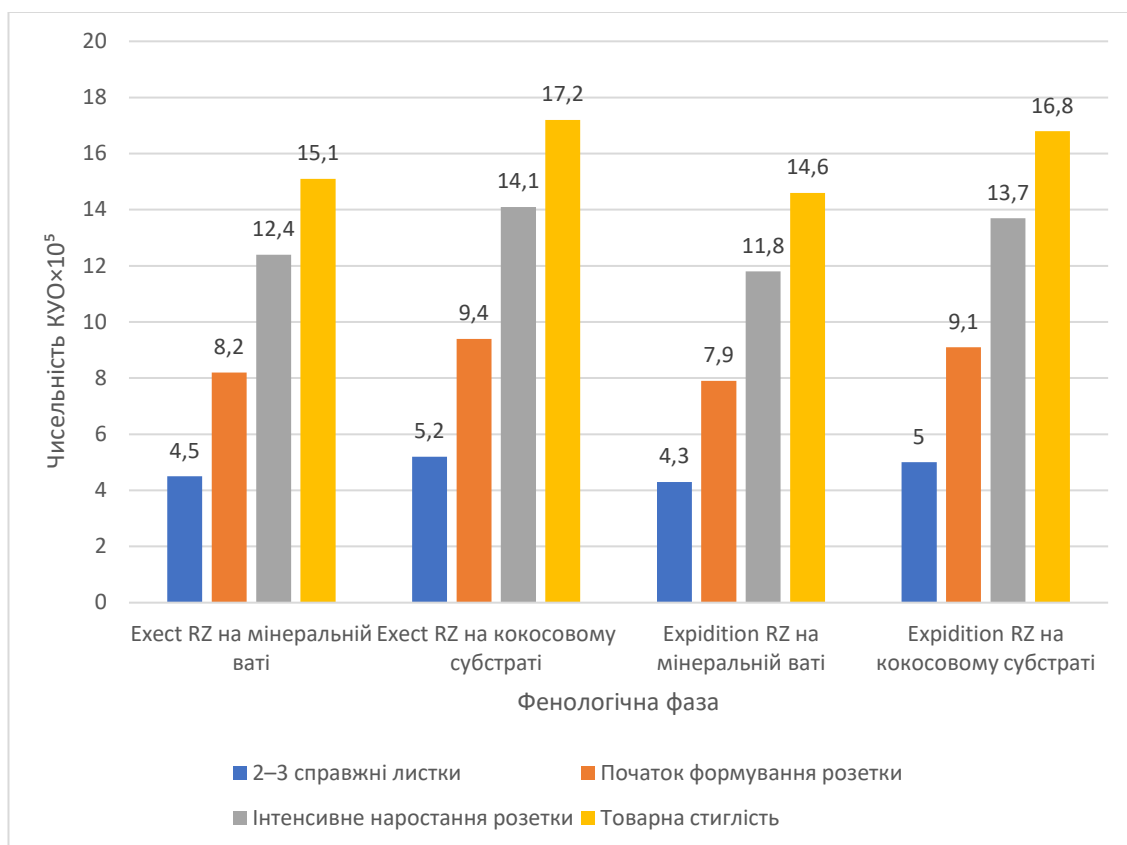


Рисунок 3.6 - Динаміка чисельності мікроорганізмів у ризосфері салату за використання біологічного препарату Хетомік, КУО $\times 10^5$

Встановлено поступове збільшення чисельності корисної мікрофлори у ризосфері салату протягом усього періоду вегетації. Найвищі показники відзначено у варіантах із використанням кокосового субстрату, що може бути пов'язано з його більш розвиненою пористою структурою та кращими умовами

для колонізації мікроорганізмами. Незалежно від сортотипу Salanova®, застосування препарату Хетомік забезпечувало стабільне формування корисного мікробного комплексу кореневої зони.

3.3 Контроль якості рециркуляційного поживного розчину

Для оцінки стабільності рециркуляційного поживного розчину у безґрунтових системах вирощування салату було проведено моніторинг показників електропровідності та кислотності середовища рН за різних способів знезараження води. Контроль зазначених параметрів є важливим елементом управління гідропонними системами, оскільки саме вони визначають доступність елементів живлення для рослин, інтенсивність поглинання поживних речовин та загальну стабільність функціонування системи вирощування.

У таблиці 3.4 наведено дані про динаміку показників електропровідності та рН рециркуляційного поживного розчину за різних способів знезараження.

Таблиця 3.4 - Динаміка показників електропровідності та рН рециркуляційного поживного розчину за різних способів знезараження

Варіант дослідження	День дослідження	рН розчину	Електропровідність (EC), mS/cm	Температура розчину, °C	Вміст нітратів (NO ₃ ⁻), мг/л	Вміст калію (K ⁺), мг/л	Вміст кальцію (Ca ²⁺), мг/л
Контроль (без обробки)	1	6,4	2,3	20,1	182	198	121
	7	6,7	2,1	21,4	154	171	109
	14	7,1	1,8	22,0	126	148	96
	1	6,3	2,3	20,0	181	197	120

Після піщаної фільтрації	7	6,5	2,0	21,0	149	169	107
	14	6,8	1,9	21,6	131	151	98
Після УФ- опромінення	1	6,2	2,4	19,8	184	201	123
	7	6,3	2,2	20,5	160	176	112
	14	6,5	2,0	21,1	142	159	103

Отримані результати свідчать про те, що застосування рециркуляції дозволяє підтримувати відносно стабільні показники електропровідності та pH у межах, оптимальних для вирощування салатних культур типу Salanova®. Найменші коливання показників спостерігалися за використання ультрафіолетового знезараження, що вказує на його ефективність не лише у зниженні мікробіологічного навантаження, а й у збереженні хімічної стабільності поживного розчину. Водночас термічна обробка характеризувалася дещо більшими змінами електропровідності внаслідок часткового осадження окремих солей та зміни концентрації розчинених компонентів.

У замкнених системах циркуляції води збудники грибних і бактеріальних хвороб здатні швидко поширюватися між рослинами, формуючи стабільні осередки інфекції та знижуючи фітосанітарну безпечність виробництва. Особливу небезпеку становлять патогенні мікроміцети родів *Fusarium* та *Rhizium*, які активно розвиваються у вологому середовищі гідропонних систем та можуть спричиняти ураження кореневої системи салатних культур.

У зв'язку з цим важливого значення набуває впровадження ефективних методів знезараження рециркуляційного поживного розчину. У дослідженнях було проведено порівняльну оцінку впливу механічної фільтрації, термічної обробки та ультрафіолетового опромінення на мікробіологічні показники поживного середовища. Додатково оцінювали ефективність комбінованого застосування УФ-опромінення з піщаною фільтрацією та біологічним препаратом «Хетомік».

Мікробіологічний аналіз рециркуляційного розчину проводили шляхом визначення загальної кількості мікроорганізмів, наявності патогенних грибів, ступеня формування бактеріальної біоплівки та вмісту органічних залишків у воді.

У таблиці 3.5 наведено дані про мікробіологічні показники рециркуляційного поживного розчину залежно від способу його знезараження.

Таблиця 3.5 - Мікробіологічні показники рециркуляційного поживного розчину залежно від способу його знезараження.

Варіант знезараження	Загальна кількість мікроорганізмів, КУО/мл	Гриби роду <i>Fusarium</i> , КУО/мл	Гриби роду <i>Rythium</i> , КУО/мл	Наявність бактеріальної біоплівки	Вміст органічних залишків, мг/л
Без знезараження (контроль)	$4,8 \times 10^5$	$2,3 \times 10^3$	$1,9 \times 10^3$	Виявлено значне утворення	18,4
Піщана фільтрація	$2,6 \times 10^5$	$1,4 \times 10^3$	$1,1 \times 10^3$	Помірне утворення	13,7
Термічне знезараження (70 °C)	$7,2 \times 10^4$	$2,1 \times 10^2$	$1,4 \times 10^2$	Слабко виражена	10,2
УФ-опромінення	$3,9 \times 10^4$	$0,8 \times 10^2$	$0,5 \times 10^2$	Практично відсутня	9,1
УФ-опромінення + піщана фільтрація	$1,7 \times 10^4$	Не виявлено	Не виявлено	Відсутня	7,8
УФ-опромінення + внесення «Хетоміку»	$2,2 \times 10^4$	Поодинокі колонії	Не виявлено	Відсутня	8,0

Отримані результати свідчать про високу ефективність комбінованого застосування ультрафіолетового опромінення та механічної фільтрації для обмеження розвитку патогенних мікроорганізмів у рециркуляційних системах. Найнижчі показники мікробного навантаження та повна відсутність грибів родів *Fusarium* і *Pythium* були зафіксовані саме у варіантах із комплексним знезараженням, що підтверджує перспективність використання таких технологій у сучасних безґрунтових системах вирощування салатних культур.

Для оцінки впливу якості рециркуляційного поживного розчину на продуктивність салатних культур було проведено визначення основних біометричних показників рослин за різних способів знезараження води. Аналіз ростових параметрів дозволяє комплексно оцінити ефективність функціонування безґрунтової системи, стабільність поживного середовища та фітосанітарний стан кореневої зони.

У таблиці 3.6 наведено про вплив якості рециркуляційного поживного розчину на біометричні показники рослин салату.

Таблиця 3.6 - Вплив якості рециркуляційного поживного розчину на біометричні показники рослин салату

Варіант досліджу	Висота рослин, см	Кількість листків, шт.	Площа листової поверхні, см ²	Маса надземної частини, г	Маса кореневої системи, г
Свіжий поживний розчин	18,7 ± 0,6	28,4 ± 1,2	842 ± 24	186,3 ± 5,8	34,7 ± 1,1
Рециркуляція без знезараження	14,9 ± 0,7	21,6 ± 1,4	653 ± 27	141,8 ± 6,2	24,1 ± 1,3
Рециркуляція + піщана фільтрація	16,5 ± 0,5	24,7 ± 1,1	741 ± 22	162,4 ± 5,1	29,3 ± 1,0

Рециркуляція + термічне знезараження	17,2 ± 0,4	26,1 ± 1,0	791 ± 20	174,5 ± 4,7	31,6 ± 0,9
Рециркуляція + УФ-опромінення	18,1 ± 0,5	27,5 ± 1,1	826 ± 23	181,7 ± 5,3	33,2 ± 1,2
Рециркуляція + УФ-опромінення + «Хетомік»	19,4 ± 0,4	29,1 ± 0,9	867 ± 19	193,6 ± 4,9	36,4 ± 0,8

Результати досліджень показали, що якість рециркуляційного поживного розчину істотно впливала на ріст і розвиток рослин салату. Найнижчі біометричні показники були зафіксовані у варіанті без знезараження розчину, де спостерігалось пригнічення росту рослин та зниження маси надземної частини.

Застосування піщаної фільтрації та фізичних методів знезараження сприяло покращенню ростових процесів і розвитку кореневої системи. Найвищі показники висоти рослин, площі листової поверхні та маси рослин були отримані у варіанті з використанням УФ-опромінення у поєднанні з біопрепаратом «Хетомік». Це свідчить про ефективність комплексного контролю мікробіологічного стану рециркуляційного поживного розчину у безґрунтових системах вирощування.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Умови праці при дослідженні безгрунтових систем

Дослідження безгрунтових систем вирощування зеленних культур проводилися в умовах навчально-наукової лабораторії університету з використанням елементів гідропонних установок, систем штучного освітлення, насосного обладнання, ємностей для приготування живильних розчинів та контрольно-вимірювальних приладів. Організація робочого процесу здійснювалася відповідно до вимог охорони праці, санітарно-гігієнічних норм та правил експлуатації електротехнічного обладнання в умовах закритого приміщення.

Під час проведення досліджень значна увага приділялася забезпеченню безпечних та комфортних умов праці для студентів і наукових працівників. Лабораторні дослідження супроводжувалися роботою з електричними приладами, водними розчинами мінеральних добрив, системами штучного освітлення та обладнанням для циркуляції живильного розчину, що вимагало дотримання відповідних нормативних вимог [56].

Одним із головних факторів безпечної роботи було забезпечення належного освітлення робочих зон. Для цього використовувалися вимоги ДСТУ 12464-1:2022 «Світло та освітлення. Освітлення робочих місць. Частина 1. Робочі місця в приміщенні», відповідно до якого рівень освітленості лабораторних приміщень повинен забезпечувати комфортне виконання зорових робіт, знижувати втому очей та мінімізувати ризик помилок під час проведення вимірювань і приготування живильних розчинів. У лабораторії використовувалося комбіноване освітлення - природне та штучне. LED-

світильники забезпечували достатню інтенсивність світлового потоку та рівномірний розподіл освітлення по робочій поверхні.

Особливе значення під час досліджень безгрунтових систем мало дотримання правил електробезпеки, оскільки експлуатація гідропонних установок пов'язана з поєднанням електричного обладнання та підвищеної вологості повітря. У роботі керувалися вимогами ДСТУ 61140:2015 «Захист від ураження електричним струмом. Загальні положення щодо безпеки установок і обладнання». Відповідно до цього стандарту всі електроприлади, які використовувалися у лабораторії, мали захисне заземлення та справну ізоляцію струмопровідних елементів. Підключення насосів, систем освітлення та автоматичних таймерів здійснювалося лише через справні мережеві фільтри та автоматичні вимикачі. Перед початком роботи проводилася перевірка технічного стану обладнання, цілісності кабелів та відсутності пошкоджень електромережі.

Важливим аспектом охорони праці була також безпечна робота з агрохімічними речовинами та мінеральними добривами, які використовувалися для приготування живильних розчинів. Під час виконання таких робіт дотримувалися положень ДСТУ 7238:2011 «Система стандартів безпеки праці. Засоби колективного захисту працюючих. Загальні вимоги та класифікація». Для мінімізації контакту з концентрованими солями та кислотами використовувалися індивідуальні засоби захисту: гумові рукавички, лабораторні халати та захисні окуляри. Приготування робочих розчинів проводилося у добре вентильованому приміщенні з використанням окремого лабораторного посуду та мірного обладнання [57].

У приміщенні лабораторії підтримувалися оптимальні санітарно-гігієнічні умови. Температура повітря перебувала у межах 18–22 °С, а відносна вологість - 50–70 %, що відповідало комфортним умовам для тривалого перебування працівників та проведення експериментальних досліджень. Регулярно здійснювалися провітрювання приміщення, очищення робочих

поверхонь та дезінфекція елементів гідропонної системи з метою попередження розвитку мікроорганізмів і біологічного забруднення.

Особлива увага приділялася організації робочого простору. Розміщення обладнання забезпечувало вільний доступ до гідропонних установок та електричних приладів, а проходи між робочими зонами залишалися вільними для безпечного пересування. Ємності з живильними розчинами встановлювалися на стійких поверхнях, що запобігало їх випадковому перекиданню та потраплянню рідини на електрообладнання.

Під час роботи з дослідними рослинами та живильними субстратами працівники дотримувалися правил особистої гігієни. Після завершення робіт проводилося миття рук та очищення робочого інвентарю. Заборонялося зберігати харчові продукти безпосередньо у лабораторному приміщенні або вживати їжу під час проведення дослідів.

З метою попередження аварійних ситуацій у лабораторії були наявні первинні засоби пожежогасіння, аптечка першої медичної допомоги та інструкції з техніки безпеки. Перед початком виконання досліджень усі учасники проходили інструктаж з охорони праці та ознайомлювалися з правилами безпечної експлуатації лабораторного обладнання [58].

4.2 Аналіз небезпечних факторів у лабораторії

Під час проведення лабораторних досліджень, пов'язаних із безгрунтовими системами вирощування рослин, працівники можуть піддаватися впливу небезпечних та шкідливих виробничих факторів різного характеру. До них належать електричні, хімічні, механічні, мікрокліматичні та пожежонебезпечні фактори. Для забезпечення безпечних умов праці необхідно дотримуватись вимог нормативно-правових актів з охорони праці, виробничої санітарії та пожежної безпеки.

Одним із найбільш небезпечних факторів у лабораторії є використання електрообладнання. У процесі досліджень застосовуються насоси, системи подачі поживних розчинів, вентиляційні установки, контрольно-вимірювальні прилади, електронні датчики, кліматичне обладнання та інші електротехнічні засоби. Небезпека виникає у разі пошкодження ізоляції проводів, порушення цілісності електричних мереж, використання несправного обладнання або недотримання правил експлуатації. Особливу небезпеку становить поєднання електрообладнання з підвищеною вологістю, що характерно для лабораторій, у яких використовуються гідропонні установки та водні розчини. У таких умовах значно підвищується ризик короткого замикання, ураження електричним струмом та виникнення аварійних ситуацій. Експлуатація електрообладнання повинна здійснюватися відповідно до вимог НПАОП 40.1-1.21-98 «Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів» та ДСТУ 61140:2015 «Захист від ураження електричним струмом» [59].

Важливим небезпечним фактором є використання хімічних речовин та мінеральних добрив для приготування поживних розчинів. До складу розчинів можуть входити солі азоту, фосфору, калію, магнію та інші хімічні компоненти, які при потраплянні на шкіру або слизові оболонки здатні викликати подразнення, алергічні реакції або хімічні опіки. Під час приготування концентрованих розчинів можливе утворення аерозолів та випарів, які негативно впливають на органи дихання. Особливу увагу необхідно приділяти правильному зберіганню реактивів та добрив, дотриманню умов герметичності тари, маркуванню ємностей і правилам поводження з хімічними речовинами. Роботи з хімічними речовинами повинні проводитися відповідно до вимог ДСТУ 7238:2011 та санітарних норм щодо безпечного використання хімічних речовин у виробничих приміщеннях.

У лабораторії можуть виникати механічні небезпеки, пов'язані з використанням лабораторного обладнання, скляного посуду, інструментів та елементів конструкцій гідропонних систем. Під час необережного поводження зі скляними ємностями існує ризик порізів та травмування рук. Також небезпеку

становлять рухомі частини насосів, вентиляторів та інших механізмів, які можуть спричинити травмування при порушенні правил безпечної експлуатації. Для зменшення ризику травматизму необхідно регулярно перевіряти технічний стан обладнання, своєчасно замінювати пошкоджені елементи та дотримуватись вимог НПАОП 0.00-1.71-13 «Правила охорони праці під час роботи з інструментом та пристроями».

Небезпечним фактором є також підвищена вологість повітря, що характерна для приміщень, де проводяться дослідження з використанням водних систем вирощування. Надмірна вологість може негативно впливати на самопочуття працівників, сприяти утворенню конденсату на поверхнях обладнання та створювати умови для розвитку мікроорганізмів і плісняви. Для підтримання безпечного мікроклімату необхідно забезпечити ефективну роботу вентиляційної системи та контролювати параметри температури й вологості відповідно до вимог ДСН 3.3.6.042-99 «Державні санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень».

Під час проведення лабораторних досліджень можливе біологічне забруднення, пов'язане з розвитком мікроорганізмів у поживних розчинах, на поверхнях обладнання або рослинному матеріалі. За відсутності належного санітарного контролю це може призводити до поширення бактерій, грибків та інших біологічних агентів. Для запобігання таким ризикам необхідно регулярно проводити санітарну обробку обладнання, очищення резервуарів та дезінфекцію робочих поверхонь.

Окрему увагу слід приділяти пожежній небезпеці. Використання електроприладів, електромереж, подовжувачів та лабораторного обладнання може стати причиною перегрівання проводки, короткого замикання або займання. Додаткову небезпеку становить наявність паперових матеріалів, пластикових елементів конструкцій та упаковок від хімічних речовин. Для забезпечення пожежної безпеки необхідно дотримуватись вимог НАПБ А.01.001-2014 «Правила пожежної безпеки в Україні» та Кодексу цивільного захисту України. У лабораторії повинні бути встановлені первинні засоби

пожежогасіння, розроблені інструкції з евакуації та забезпечений постійний контроль за справністю електромережі.

Крім того, під час тривалої роботи в лабораторії можливе виникнення психофізіологічних навантажень, пов'язаних із високою концентрацією уваги, монотонністю роботи та необхідністю постійного контролю параметрів дослідження. Такі фактори можуть спричиняти втому, зниження працездатності та підвищення ризику помилок під час роботи з обладнанням. Для зниження негативного впливу необхідно дотримуватись встановленого режиму праці та відпочинку.

Таким чином, лабораторія, у якій проводяться дослідження безґрунтових систем вирощування рослин, характеризується наявністю комплексу небезпечних і шкідливих факторів. Забезпечення безпечних умов праці можливе лише за умови суворого дотримання нормативних вимог охорони праці, контролю технічного стану обладнання, правильної організації робочого процесу та виконання санітарно-гігієнічних заходів [60].

4.3 Пожежна безпека та охорона праці в лабораторії

Забезпечення пожежної безпеки та охорони праці в лабораторії є важливою складовою організації безпечного проведення досліджень у сфері безґрунтового вирощування рослин. Робота в лабораторних умовах пов'язана з використанням електрообладнання, поживних розчинів, хімічних речовин та різноманітних технічних пристроїв, що потребує суворого дотримання вимог чинного законодавства з охорони праці та пожежної безпеки.

Організація охорони праці в лабораторії повинна здійснюватися відповідно до Закону України «Про охорону праці», Кодексу законів про працю України та інших нормативно-правових актів. Основною метою охорони праці є створення безпечних і нешкідливих умов праці, запобігання виробничому

травматизму та професійним захворюванням. До виконання лабораторних робіт допускаються особи, які пройшли інструктаж з охорони праці, ознайомлені з правилами безпечної експлуатації обладнання та методами дій у разі виникнення аварійних ситуацій.

У лабораторії необхідно забезпечити належний технічний стан обладнання та справність інженерних комунікацій. Перед початком роботи працівники повинні перевіряти цілісність електропроводки, справність насосів, датчиків, вимірювальних приладів та іншого лабораторного обладнання. Експлуатація несправних пристроїв або обладнання з пошкодженою ізоляцією не допускається. Робота електроустановок повинна відповідати вимогам НПАОП 40.1-1.21-98 «Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів» [61].

Особливу увагу необхідно приділяти безпечному поводженню з хімічними речовинами та мінеральними добривами, що використовуються для приготування поживних розчинів. У лабораторії повинні бути визначені спеціальні місця для зберігання реактивів, а ємності з хімічними речовинами мають бути герметично закритими та промаркованими. Під час роботи з концентрованими розчинами необхідно уникати їх потрапляння на шкіру та слизові оболонки. Після завершення роботи працівники повинні проводити очищення та санітарну обробку робочих поверхонь і обладнання.

Одним із важливих елементів охорони праці є підтримання належного санітарно-гігієнічного стану приміщення. У лабораторії необхідно регулярно проводити прибирання, контролювати чистоту обладнання та забезпечувати належне функціонування вентиляційної системи. Відповідно до вимог ДСН 3.3.6.042-99 необхідно підтримувати допустимі параметри мікроклімату, що сприяють безпечним та комфортним умовам праці.

Пожежна безпека лабораторії повинна забезпечуватись відповідно до Кодексу цивільного захисту України та НАПБ А.01.001-2014 «Правила пожежної безпеки в Україні». Основними причинами виникнення пожеж у лабораторіях можуть бути несправність електрообладнання, перевантаження

електромережі, коротке замикання, порушення правил експлуатації електроприладів та неправильне зберігання горючих матеріалів.

Для запобігання пожежам у лабораторії необхідно:

1. забезпечити справний стан електромережі та електрообладнання;
2. не допускати використання пошкоджених проводів і подовжувачів;
3. контролювати навантаження на електромережу;
4. зберігати хімічні речовини відповідно до встановлених вимог;
5. підтримувати вільний доступ до евакуаційних виходів;
6. дотримуватись правил користування електроприладами.

У лабораторії повинні бути встановлені первинні засоби пожежогасіння, зокрема вогнегасники, які необхідно розміщувати у доступних місцях. Працівники лабораторії повинні бути ознайомлені з правилами користування засобами пожежогасіння та порядком дій у разі виникнення пожежі. Також у приміщенні мають бути розміщені плани евакуації та інструкції з пожежної безпеки.

У разі виникнення аварійної ситуації або пожежі необхідно негайно відключити електроживлення обладнання, повідомити відповідні служби та організувати евакуацію людей із приміщення. Дотримання встановлених правил охорони праці та пожежної безпеки дозволяє мінімізувати ризик виникнення небезпечних ситуацій і забезпечити безпечне проведення лабораторних досліджень.

Таким чином, ефективна організація охорони праці та пожежної безпеки в лабораторії є необхідною умовою для забезпечення безпечного робочого середовища, збереження здоров'я працівників та безперебійного проведення науково-дослідних робіт [62].

ВИСНОВКИ

У результаті досліджень проведено комплексну екологічну оцінку сталих безґрунтових систем вирощування салатних культур лінійки Саланова в умовах монокультурних теплиць із використанням мінеральної вати та кокосового субстрату. Дослідження були спрямовані на вивчення екологічних, мікробіологічних та технологічних переваг безґрунтових систем вирощування, а також оцінку можливостей їхнього впровадження у сучасне тепличне виробництво України.

У результаті аналізу закордонних технологій та проведених експериментальних досліджень встановлено, що безґрунтові технології є одним із найбільш перспективних напрямів розвитку овочівництва закритого ґрунту в умовах зростання антропогенного навантаження на довкілля, урбанізації та необхідності підвищення ефективності використання природних ресурсів. На відміну від традиційного землеробства, такі системи дозволяють повністю усунути ризики деградації ґрунтів, ерозійних процесів, виснаження родючості та накопичення залишкових кількостей пестицидів у ґрунтовому середовищі.

Встановлено, що використання стерильних субстратів створює принципово нові можливості для керування процесами росту і розвитку рослин. На відміну від природних ґрунтів, де вже сформований складний та часто неконтрольований мікробіом, безґрунтові системи дозволяють формувати ризосферне середовище практично з початкового етапу розвитку рослин. Такий підхід дає змогу спрямовано вводити біологічні препарати та створювати контрольований мікробіом із переважанням корисних або антагоністичних до патогенів мікроорганізмів.

За результатами досліджень підтверджено ефективність використання біологічного препарату «Хетомік» для формування стабільного мікробіому

ризосфери. Встановлено поступове збільшення чисельності антагоністичних мікроорганізмів протягом усього циклу вирощування та одночасне зменшення кількості фітопатогенних грибів родів *Fusarium* і *Pythium*. Отримані результати свідчать про високу ефективність біологічного методу регулювання фітосанітарного стану рослин без застосування додаткового хімічного навантаження на агроecosистему.

Доведено, що безґрунтові системи забезпечують високий рівень мікробіологічної чистоти виробничого середовища. Порівняно з умовним ґрунтовим контролем кількість патогенних мікроорганізмів у мінеральній ваті та кокосовому субстраті була в декілька разів нижчою. Це підтверджує можливість формування керованого агроценозу з прогнозованими характеристиками ризосфери та мінімальним ризиком виникнення спалахів захворювань.

У процесі досліджень встановлено позитивний вплив препарату «Хетомік» на ріст і розвиток салатних культур. Найвищі показники приросту біомаси та висоти рослин були отримані у варіантах із використанням кокосового субстрату. Для сорту Експідишн приріст біомаси досягав 15,0 %, а приріст висоти рослин — 16,8 % порівняно з базовим варіантом. Отримані результати свідчать про сприятливий вплив кокосового субстрату на розвиток кореневої системи, водоутримувальну здатність середовища та активність ризосферної мікробіоти.

Встановлено, що кокосовий субстрат забезпечує більш інтенсивне формування мікробіому ризосфери та сприяє активнішій колонізації кореневої системи антагоністичними мікроорганізмами. Водночас мінеральна вата характеризується найвищим рівнем початкової стерильності та стабільністю фізичних властивостей протягом усього циклу вирощування. Це дозволяє розглядати обидва субстрати як ефективні компоненти сучасних систем контрольованого рослинництва.

Особливого значення набуває екологічний аспект застосування безґрунтових технологій. Завдяки точному дозуванню поживних речовин та використанню замкнених або напівзамкнених систем циркуляції поживного

розчину зменшуються втрати води та елементів живлення, що сприяє скороченню негативного впливу на навколишнє середовище. Крім того, відсутність необхідності інтенсивного застосування фунгіцидів і дезінфектантів дозволяє знизити хімічне навантаження на виробничі системи та отримувати екологічно безпечну продукцію.

Проведена оцінка свідчить, що використання стерильних субстратів і контрольованого мікробіому створює передумови для виробництва салатної продукції з високим рівнем санітарної безпечності. Відсутність контакту рослин із ґрунтом, органічними відходами та неконтрольованими джерелами інфекції дозволяє мінімізувати ризики мікробіологічного забруднення продукції та зберігати її якість протягом післязбирального періоду.

Окремий інтерес становить питання утилізації субстратів після завершення виробничого циклу. Проведений аналіз показав, що кокосовий субстрат має кращі перспективи повторного використання та компостування, що потенційно сприяє зменшенню вуглецевого сліду виробництва. Водночас мінеральна вата забезпечує триваліший термін експлуатації та можливість використання у декількох виробничих циклах за умови належної дезінфекції. Таким чином, вибір субстрату повинен здійснюватися з урахуванням як виробничих, так і екологічних критеріїв.

Результати роботи також підтверджують перспективність інтеграції безґрунтових технологій у концепцію «розумної теплиці» та вертикального фермерства. Поєднання контрольованого мікроклімату, автоматизованого керування живленням рослин, вискоефективного LED-освітлення, моніторингу параметрів середовища та керованого мікробіому дозволяє створювати високопродуктивні агроєкосистеми нового покоління. Такі технології вже успішно застосовуються у Нідерландах, Японії та Сінгапурі, де забезпечують виробництво свіжої продукції безпосередньо в межах урбанізованих територій.

Отримані результати дозволяють зробити висновок, що безґрунтові системи вирощування салатних культур є не лише ефективною агротехнологією, а й перспективним екологічним інструментом забезпечення продовольчої

безпеки в умовах глобальних змін клімату, зростання чисельності населення та обмеженості земельних ресурсів. Впровадження таких технологій в Україні сприятиме розвитку сучасного тепличного виробництва, зменшенню екологічного навантаження на довкілля та переходу до принципів сталого агровиробництва майбутнього.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Андрієнко Г.І., Буц М.О., Суліма Л.Т. Вирощування овочів в гідропонних теплицях // Овочівництво закритого ґрунту / За ред. Бондаренка Г.П. – К.: Урожай, 1978. – С. 131–144.
2. Барабаш О.Ю., Семенчук П.С. Довідник овочівника. – Львів: Коментар, 1985.
3. Станінець Н.П. Особливості розподілу і виносу азоту, фосфору й калію рослинами помідорів в умовах гідропоніки // Овочівництво і баштанництво. – К.: Урожай, 1988. – Вип. 31. – С. 49–51.
4. Frischknecht, R., Jungbluth, N., Althaus, H.-J., Doka, G., Dones, R., Heck, T., Hellweg, S., Hirschler, R., Nemecek, T., Rebitzer, G., Spielmann, M., 2005. The ecoinvent database: overview and methodological framework (7 pp). *Int. J. Life Cycle Assess.* 10, 3–9
5. Gonnella, M., Renna, M., 2021b. The evolution of soilless systems towards ecological sustainability in the perspective of a circular economy. Is it really the opposite of organic agriculture? *Agronomy* 11, 950
6. Paucek, I., Pennisi, G., Pistillo, A., Appolloni, E., Crepaldi, A., Calegari, B., Spinelli, F., Cellini, A., Gabarrell, X., Orsini, F., Gianquinto, G., 2020a. Supplementary LED interlighting improves yield and precocity of greenhouse tomatoes in the mediterranean. *Agronomy* 10, 1002
7. Гіль Л.С. Фертигація – зрошення з використанням розчинних добрив у системах краплинного поливу. – Етнос, 2005. – 93 с.
8. Гродзинський А.М., Гродзинський Д.М. Вплив світла та асиміляції вуглекислого газу листям на поглинальну діяльність кореневої системи рослин // Роль мінеральних елементів в обміні речовин і продуктивності рослин. – М.: Наука, 1964. – С. 205–210.

9. Корсун В.І., Суліма Л.Т., Мостицький О.К. Тепличні овочі на мінеральній ваті // Плодово-овочеве господарство. – 1985. – № 5. – С. 32–34.
10. Ладогіна М.П. Поживні розчини для вирощування овочевих культур на мінеральній ваті. – М., 1991. – № 1.
11. Магницький К.П. Контроль живлення рослин на гідропонії // Гідропоніка в сільському господарстві. – М.: Колос, 1965. – С. 78–83.
12. De Rijck G. Schrevens E. (1998a). Elemental bioavailability in nutrient solutions in relation to complexation reactions. *J. Plant Nutr.* 21, 849–859.
13. de Santiago A. García-López A. M. Quintero J. M. Avilés M. Delgado A. (2013). Effect of *Trichoderma asperellum* strain T34 and glucose addition on iron nutrition in cucumber grown on calcareous soils. *Soil Biol. Biochem.* 57, 598–605
14. Dukes M. D. Zotarelli L. Liu G. D. Simonne E. H. (2012). Principles and practices of irrigation management for vegetables
15. El Kassis E. Cathala N. Rouached H. Fourcroy P. Berthomieu P. Terry N. et al. (2007). Characterization of a selenate-resistant *Arabidopsis* mutant. Root growth as a potential target for selenate toxicity. *Plant Physiol.* 143, 1231–1241
16. El-Sayed S. F. Hassan H. A. Mahmoud S. O. (2015). Effect of some soilless culture techniques on sweet pepper growth, production, leaves chemical contents and water consumption under greenhouse conditions. *Middle East J. Agric. Res.*, 682–691
17. Fageria N. K. (2010). The use of nutrients in crop plants. Broken Sound Parakway NW, Suite, Boca Raton: CRC Press.
18. Методичні вказівки з діагностики мінерального живлення рослин. – М.: ТСХА, 1988. – 28 с.
19. Буц М.А., Суліма Л.Т., Гуляєв Б.І., Митрофанов Б.А. Підживлення рослин вуглекислим газом відхідних газів котельні // Картопля і овочі. – 1979. – № 7. – 34 с.
20. Ратнер Є.І. Живлення рослин і застосування добрив. – М.: Наука, 1965. – 220 с.

21. Потопальський А.І., Ткачук З.Ю., Северин В.І., Зубко М.К., Ларченко Є.А., Суліма Л.Т., Харчук Є.І., Онищук А.В. Спосіб стимулювання росту рослин. Авторське свідоцтво № 113914. – М.: ВНІПТІПЕ, 1984.
22. Sonneveld C.A. Метод розрахунку складу поживних розчинів для безґрунтових культур. Naaldwijk Research Station. Proceedings 57, 1982, Netherlands.
23. Ferrarese M., Sourestani M., Quattrini E., Schiavi M., Ferrante A. (2012). Biofortification of spinach plants applying selenium in the nutrient solution of floating system. Veg. Crop. Res. Bull. 76, 127–136
24. Giro A., Ferrante A. (2017). Postharvest physiology of *Corchorus olitorius* baby leaf growing with different nutrient solutions. J. Hortic. Sci. Biotechnol. 93, 1–9
25. Grattan S., Grieve C. (1998). Salinity-mineral nutrient relations in horticultural crops. Sci. Hortic. 78, 127–157.
26. Haynes R. J., Goh K. M. (1978). Ammonium and nitrate nutrition of plants. Biol. Rev. 53, 465–510
27. Hickman G. (2016). International greenhouse vegetable production – Statistics. Mariposa, CA, USA: Cuesta Roble Greenhouse Vegetable Consulting
28. Jung D. H., Kim H. -J., Choi G. L., Ahn T. -I., Son J. -E., Sudduth K. A. (2015). Automated lettuce nutrient solution management using an array of ion-selective electrodes. Trans. ASABE 58, 1309–1319
29. Wallach, R., 2008. Physical characteristics of soilless media. In: Raviv, M., Lieth, J.H. (Eds.), Soilless Culture: Theory and Practice. Academic Press, San Diego, USA, pp. 41–116
30. Valverde, M., Madrid, R., García, A.L., del Amor, F.M., Rincón, L.F., 2013. Use of almond shell and almond hull as substrates for sweet pepper cultivation. Effects of fruit yield and mineral content. Span. J. Agric. Res. 11 (1), 164–172
31. Trckova, M., Matlova, L., Hudcova, H., Faldyna, M., Zraly, Z., Dvorska, L., Beran, V., Pavlik, I., 2005. Peat as a feed supplement for animals: a review. Vet. Med. (Czech) 50 (8), 361–37

32. Spokas, K.A., Cantrell, K.B., Novak, J.M., Archer, D.W., Ippolito, J.A., Collins, H.P., Boateng, A.A., Lima, I.M., Lamb, M.C., McAloon, A.J., Lentz, R.D., Nichols, K.A., 2012. Biochar: a synthesis of its agronomic impact beyond carbon sequestration. *J. Environ. Qual.* 41 (4), 973–989.
33. Prasad, M., Carlile, W.R., 2009. Practical experiences and background research on the use of composted materials in growing media for the UK market. *Acta Hortic.* 819, 111–124
34. Parente, A., Serio, F., Montesano, F.F., Mininni, C., Santamaria, P., 2014. The compost of *Posidonia* residues: a short review on a new component for soilless growing media. *Acta Hortic.* 1034, 291–298.
35. Ostos, J.C., López-Garrido, R., Murillo, J.M., López, R., 2008. Substitution of peat for municipal solid waste- and sewage sludge-based composts in nursery growing media: effects on growth and nutrition of the native shrub *Pistacia lentiscus* L. *Bioresour. Technol.* 99 (6), 1793–1800.
36. NiChualain, D., Carlile, W., Hynes, C., Phelan, G., O’Haire, R., Doyle, O.P.E., 2011. Nutrient status of co-composted indigenous Irish wastes, and their use in growing media. *Acta Hortic.* 891, 85–92.
37. Mininni, C., Grassi, F., Traversa, A., Coccozza, C., Parente, A., Miano, T., Santamaria, P., 2015. *Posidonia oceanica* (L.) based compost as substrate for potted basil production. *J. Sci. Food Agric.* 95 (10), 2041–2046.
38. Пересипкін В.Ф. Сільськогосподарська фітопатологія / В.Ф. Пересипкін – К.: Аграрна освіта, 2000. – 415 с.
39. Писаренко В.М. Захист рослин: екологічно-обґрунтовані системи / В.М. Писаренко, П.В. Писаренко. – Полтава: Камелот, 2000. – 188 с.
40. Біологізація землеробства та виробництво екологічно чистої рослинної продукції / [Михайлевський М.В., Гончарук О.В., Чернявський О.А. та ін.]. – Чернівці: Митець, – 1997. – 102 с.
41. Досвід виробництва та маркетингу овочів в Україні (Результати досліджень «Проекту аграрного маркетингу» за 2004-2005 рр). – К.: USAID, 2006.– 381 с.

42. Sharma N. Hydroponics as an advanced technique for vegetable production: An overview / N. Sharma, S. Acharya, K. Kaushal, N. Singh, O. P. Chaurasia // Journal of Soil and Water Conservation. – 2019. - 17(4). - P. 364-371. DOI: 10.5958 / 2455-7145.2018.00056.5
43. Економічні витрати на гідропонні теплиці. URL: <https://proconsulting.ua/ua/pressroom/zelen-v-rezhime-non-stop-u-nas-est-proekt-sozdaniya-pribylnogoteplichnogo-hozyajstva>
44. Kronzucker H. J., Glass A. D. M., Siddiqi M. Y. (1999). Inhibition of nitrate uptake by ammonium in barley. Analysis of component fluxes. *Plant Physiol.* 120, 283–292. doi: 10.1104/pp.120.1.283
45. Lee S., Lee J. (2015) Beneficial bacteria and fungi in hydroponic systems: types and characteristics of hydroponic food production methods. *Sci. Hortic.* 195, 206–215. doi:10.1016/j.scienta.2015.09.011
46. Marschner P. (2012). *Marschner's mineral nutrition of higher plants. 3rd Edn.* London: Academic Press.
47. McBride M. B. (1994). Environmental chemistry of soils. New York, USA: Oxford University Press.
48. Rijk Zwaan. Salanova lettuce concept: innovative solutions for modern greenhouse production. – De Lier, Netherlands: Rijk Zwaan Publishing, 2022. – 48 p.
49. Van der Burg A., Vermeulen P. Advanced greenhouse lettuce production in soilless cultivation systems. – Wageningen Academic Publishers, 2020. – 216 p.
50. Resh H.M. Hydroponic Food Production: A Definitive Guidebook for the Advanced Home Gardener and the Commercial Hydroponic Grower. – 8th ed. – Boca Raton: CRC Press, 2022. – 567 p.
51. Savvas D., Gruda N. Application of Soilless Culture Technologies in the Modern Greenhouse Industry – A Review. // European Journal of Horticultural Science. – 2018. – Vol. 83(5). – P. 280–293.
52. Raviv M., Lieth J.H., Bar-Tal A. Soilless Culture: Theory and Practice. – 2nd ed. – Amsterdam: Elsevier, 2019. – 712 p.

53. ДСТУ 7847:2015. Якість ґрунту. Визначення чисельності мікроорганізмів у ґрунті методом посіву на тверде (агаризоване) живильне середовище. – Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2016. – 20 с.
54. ДСТУ ISO 10381-4:2005. Якість ґрунту. Відбирання проб. Частина 4. Настанови щодо процедури дослідження природних, майже природних та оброблюваних ділянок (ISO 10381-4:2003, IDT). – Київ: Держспоживстандарт України, 2007.
55. ДСТУ 7625:2014. Ґрунти тепличні. Метод визначення рН водної суспензії. – Київ: Мінекономрозвитку України, 2015.
56. Закон України «Про охорону праці». – Відомості Верховної Ради України. – Київ, 1992 (зі змінами та доповненнями).
57. ДБН В.2.2-2-2018. Будинки і споруди. Теплиці та парники. – Київ: Мінрегіон України, 2018. – 42 с.
58. Жидецький В.Ц. Основи охорони праці. – 6-те вид. – Львів: Афіша, 2014. – 376 с.
59. НПАОП 01.0-1.01-12. Правила охорони праці у сільськогосподарському виробництві. – Київ: Міністерство соціальної політики України, 2012. – 128 с.
60. Кобилянський О.В., Дембіцька С.В. Безпека праці в агропромисловому комплексі. – Вінниця: ВНТУ, 2020. – 214 с.
61. Токарчук Д.М., Паламарчук І.П. Охорона праці та безпека життєдіяльності в аграрному виробництві. – Київ: Центр учбової літератури, 2021. – 286 с.
62. Гогіташвілі Г.Г., Лапін В.М. Охорона праці в сільському господарстві. – Львів: Новий Світ-2000, 2018. – 312 с.