

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

Навчально-науковий інститут екології, зеленої енергетики та сталого розвитку

Кафедра екології та менеджменту довкілля

До захисту допущено

Кафедрою екології та менеджменту довкілля протокол № _____ від _____

В.о. завідувача кафедри _____ Андрій АЧАСОВ
(підпис) (ім'я, прізвище)

« _____ » _____ 2026 р.

Кваліфікаційна робота
здобувача першого (бакалаврського) рівня вищої освіти

Оцінка фізико-хімічних параметрів живильного розчину в гідропонних системах та їх вплив на продуктивність овочевих культур
(назва роботи)

Спеціальність (спеціалізація) _____ 201 Агрономія
(код та найменування спеціальності)

Освітня програма _____ Агроменеджмент і цифрові технології в агробізнесі
(назва освітньої програми)

Виконавець _____ Владислав ЧАЙКОВСЬКИЙ
(підпис) (ім'я, прізвище)

Науковий керівник _____ Анатолій ЛІСНЯК
(підпис) (ім'я, прізвище)

Харків – 2026

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ імені В. Н. КАРАЗІНА

Інститут: Навчально-науковий інститут екології, сталого розвитку та зеленої енергетики

Кафедра: екології та менеджменту довкілля

Рівень вищої освіти: бакалавр

Спеціальність 201 Агрономія

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри

_____ / проф. Андрій АЧАСОВ
підпис ім'я та прізвище

“__” _____ 2025 року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ (ПРОЕКТ)

Владиславу ЧАЙКОВСЬКОМУ
(ім'я, прізвище студента)

1. Назва теми роботи для завдання Оцінка фізико-хімічних параметрів живильного розчину в гідропонних системах та їх вплив на продуктивність овочевих культур

керівник роботи студента Анатолій ЛІСНЯК, канд. с.-г. наук, доцент,
(ім'я, по-батькові, прізвище, вчене звання, науковий ступінь)

затверджені наказом по університету від “__” _____ 20__ року №__

2. Строк подання студентом роботи _____

3. Перелік питань, які потрібно дослідити:

1. Провести системний аналіз наукових джерел щодо впливу фізико-хімічних факторів водного середовища на продуктивність рослин у гідропонних системах.

2. Розробити методичний підхід до комплексної оцінки фізико-хімічних параметрів водних розчинів у гідропонних системах.

3. Дослідити динаміку змін основних фізико-хімічних показників (рН, мінералізація, засоленість, електропровідність, концентрація макроелементів) у процесі вегетації рослин.

4. Встановити залежності між параметрами водного середовища та продуктивними характеристиками овочевих культур.

5. Розробити рекомендації щодо оптимізації фізико-хімічного складу водних розчинів для різних фаз росту овочевих культур.

6. Формування висновків на основі аналізу результатів, виявлення кращих варіантів для гідропонних систем та надання практичних рекомендацій.

4. Планування роботи відповідно до кожного етапу наукового дослідження:

№ з/п	Конкретні етапи дослідження
1	Провести системний аналіз наукових джерел щодо впливу фізико-хімічних параметрів водного середовища на ріст і продуктивність рослин у гідропонних системах
2	Розробити методичний підхід та схему експерименту для комплексної оцінки фізико-хімічних показників живильного розчину
3	Провести експериментальні дослідження динаміки змін рН, мінералізації, засоленості, електропровідності та макроелементів у гідропонних системах
4	Визначити вплив фізико-хімічних параметрів живильного розчину на ріст і продуктивність листового салату, шпинату та петрушки
5	Встановити залежності між складом живильного середовища та врожайністю культур і розроблено рекомендації щодо його оптимізації
6	Узагальнити результати досліджень, визначити найбільш ефективні варіанти живлення та сформулювати практичні рекомендації для гідропонного виробництва

5. Дата видачі завдання студенту « 09 » червня 2025 року

Студент

підпис

Владислав ЧАЙКОВСЬКИЙ

ім'я і прізвище

Керівник роботи

підпис

Анатолій ЛІСНЯК

ім'я і прізвище

АНОТАЦІЯ

**ОЦІНКА ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЖИВИЛЬНОГО РОЗЧИНУ
В ГІДРОПОННИХ СИСТЕМАХ ТА ЇХ ВПЛИВ НА ПРОДУКТИВНІСТЬ
ОВОЧЕВИХ КУЛЬТУР**

Владислав ЧАЙКОВСЬКИЙ

Кваліфікаційна робота «Оцінка фізико-хімічних параметрів живильного розчину в гідропонних системах та їх вплив на продуктивність овочевих культур» складається з 55 сторінок, поділених на 4 розділи, 9 підрозділів, містить 10 рисунків, 6 таблиць та 34 джерела інформації.

Метою роботи є оцінка фізико-хімічних параметрів живильного розчину в гідропонних системах, встановлення їх впливу на ріст, розвиток і продуктивність овочевих культур, а також розроблення рекомендацій щодо оптимізації складу живильного середовища для підвищення ефективності гідропонного вирощування.

Об'єктом досліджень є живильні розчини та овочеві культури, що вирощуються у гідропонних системах.

Предметом дослідження є фізико-хімічні параметри живильного розчину, зокрема рН, загальна мінералізація, засоленість, електропровідність і концентрація макроелементів, а також їх вплив на продуктивність овочевих культур.

Методи дослідження включали аналіз наукової та нормативної літератури, інструментально-лабораторні методи оцінки фізико-хімічних показників водних розчинів, кондуктометричні методи визначення якості живильного середовища, статистичне опрацювання результатів досліджень і порівняльний аналіз отриманих даних.

Короткий опис роботи. У роботі проведено оцінку фізико-хімічних параметрів живильного розчину в гідропонних системах та досліджено їх вплив на продуктивність листового салату, шпинату і петрушки. Визначено динаміку змін рН, мінералізації, засоленості, електропровідності та концентрації

основних макроелементів залежно від рівня мінерального живлення. Здійснено порівняльний аналіз продуктивності овочевих культур за різних варіантів живильного розчину, встановлено залежності між фізико-хімічними показниками водного середовища та врожайністю рослин. На основі отриманих результатів визначено оптимальні параметри живильного розчину та розроблено практичні рекомендації щодо ефективного використання гідропонних технологій у вирощуванні овочевих культур.

ГІДРОПОННІ СИСТЕМИ, ЖИВИЛЬНИЙ РОЗЧИН, ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ПОКАЗНИКИ, рН, ЕЛЕКТРОПРОВІДНІСТЬ, МІНЕРАЛІЗАЦІЯ, МАКРОЕЛЕМЕНТИ, ОВОЧЕВІ КУЛЬТУРИ, ПРОДУКТИВНІСТЬ, ГІДРОПОНІКА

ABSTRACT

ASSESSMENT OF PHYSICOCHEMICAL PARAMETERS OF NUTRIENT SOLUTION IN HYDROPONIC SYSTEMS AND THEIR IMPACT ON THE PRODUCTIVITY OF VEGETABLE CROPS

Vladislav TCHAIKOVSKY

The qualification work "Assessment of physicochemical parameters of nutrient solution in hydroponic systems and their impact on the productivity of vegetable crops" consists of 55 pages, divided into 4 sections, 9 subsections, contains 10 figures, 6 tables and 34 sources of information.

The purpose of the work is to assess the physicochemical parameters of the nutrient solution in hydroponic systems, to establish their impact on the growth, development and productivity of vegetable crops, as well as to develop recommendations for optimizing the composition of the nutrient medium to increase the efficiency of hydroponic cultivation.

The object of research is nutrient solutions and vegetable crops grown in hydroponic systems.

The subject of the study is the physicochemical parameters of the nutrient solution, in particular pH, total mineralization, salinity, electrical conductivity and concentration of macroelements, as well as their impact on the productivity of vegetable crops.

The research methods included the analysis of scientific and regulatory literature, instrumental and laboratory methods for assessing the physicochemical parameters of aqueous solutions, conductometric methods for determining the quality of the nutrient medium, statistical processing of research results and comparative analysis of the data obtained.

Brief description of the work. The work assessed the physicochemical parameters of the nutrient solution in hydroponic systems and investigated their impact on the productivity of leaf lettuce, spinach and parsley. The dynamics of changes in pH, mineralization, salinity, electrical conductivity and concentration of

basic macroelements depending on the level of mineral nutrition were determined. A comparative analysis of the productivity of vegetable crops under different nutrient solution options was carried out, and the dependences between the physicochemical parameters of the aquatic environment and plant yield were established. Based on the results obtained, the optimal parameters of the nutrient solution were determined and practical recommendations were developed for the effective use of hydroponic technologies in growing vegetable crops.

HYDROPONIC SYSTEMS, NUTRIENT SOLUTION, PHYSICAL AND
CHEMICAL INDICATORS, pH, ELECTRICAL CONDUCTIVITY,
MINERALIZATION, MACROELEMENTS, VEGETABLE CROPS,
PRODUCTIVITY, HYDROPONICS

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	9
ВСТУП.....	10
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ВИКОРИСТАННЯ ГІДРОПОННИХ СИСТЕМ У ВИРОЩУВАННІ ОВОЧЕВИХ КУЛЬТУР.....	13
1.1. Сучасний стан та перспективи розвитку гідропонних технологій.....	13
1.2. Роль фізико-хімічних параметрів живильного розчину в гідропонних системах.....	16
1.3. Вплив мінерального живлення на продуктивність овочевих культур в гідропонних системах.....	20
РОЗДІЛ 2. ОРГАНІЗАЦІЯ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ.....	24
2.1. Умови проведення експериментальних досліджень.....	24
2.2. Методика визначення фізико-хімічних показників та продуктивності культур	26
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ АНАЛІЗ.....	29
3.1. Аналіз результатів дослідження фізико-хімічних показників живильного розчину.....	29
3.2. Вплив складу живильного розчину на ріст і розвиток культур в гідропонних системах.....	39
3.3. Економічна ефективність вирощування овочевих культур у гідропонних системах	43
3.4. Рекомендації з оптимізації живильного середовища в гідропонних системах.....	46
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ.....	48
ВИСНОВКИ.....	51
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	53

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

Гідропоніка – технологія вирощування рослин без ґрунту із застосуванням живильних розчинів;

ЕС (Electrical Conductivity) – електропровідність живильного розчину;

pH – водневий показник (кислотність або лужність середовища);

$\mu\text{S}/\text{cm}$ – мікросіменс на сантиметр (одиниця вимірювання електропровідності);

мг/л – міліграм на літр;

мг/дм³ – міліграм на кубічний дециметр;

кг/м² – кілограм на квадратний метр;

N – азот;

P – фосфор;

K – калій;

НРК – комплекс основних макроелементів живлення рослин (азот, фосфор, калій);

ГДК – гранично допустима концентрація;

ДСТУ – державний стандарт України;

г/10 л – грамів добрива на 10 літрів води;

16:16:16 – співвідношення вмісту азоту, фосфору та калію в нітроамофосці;

Контроль – варіант дослідів без внесення добрив;

50% норми добрив – варіант із внесенням нітроамофоски у дозі 5 г/10 л води;

100% норми добрив – варіант із внесенням нітроамофоски у дозі 10 г/10 л води.

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасне сільське господарство характеризується активним впровадженням інноваційних технологій вирощування рослин, серед яких важливе місце займають гідропонні системи. Гідропоніка є перспективним напрямом інтенсивного овочівництва, що забезпечує ефективне використання водних і земельних ресурсів, скорочення виробничих витрат, можливість цілорічного вирощування рослин та отримання стабільної врожайності незалежно від ґрунтових і кліматичних умов. У сучасних умовах обмеженості природних ресурсів та зростання потреб населення у якісній овочевій продукції використання гідропонних технологій набуває особливої актуальності.

Ефективність функціонування гідропонних систем значною мірою залежить від фізико-хімічних характеристик живильного розчину, який виступає основним джерелом води та елементів мінерального живлення для рослин. До найважливіших показників належать рН, електропровідність, загальна мінералізація, засоленість та концентрація макроелементів, які визначають доступність поживних речовин, інтенсивність фізіологічних процесів та рівень продуктивності овочевих культур [1, 2].

Порушення оптимального співвідношення фізико-хімічних параметрів живильного середовища може призводити до погіршення засвоєння елементів живлення, розвитку фізіологічних стресів, пригнічення ростових процесів та зниження врожайності рослин. Водночас оптимізація складу живильного розчину дозволяє суттєво підвищити ефективність вирощування овочевих культур, покращити якість продукції та забезпечити раціональне використання водних ресурсів.

Особливої актуальності набувають дослідження, спрямовані на оцінку впливу мінерального живлення на фізико-хімічні властивості живильних розчинів та продуктивність овочевих культур у гідропонних системах. Встановлення оптимальних параметрів водного середовища для листового салату, шпинату та петрушки є важливим науково-практичним завданням, що

має значення для розвитку сучасного тепличного виробництва та вертикального фермерства.

Отже, дослідження фізико-хімічних параметрів живильного розчину та їх впливу на продуктивність овочевих культур у гідропонних системах є актуальним напрямом наукових досліджень, результати якого мають важливе теоретичне та практичне значення для підвищення ефективності овочівництва і впровадження ресурсозберігаючих технологій.

Мета роботи: встановлення взаємозв'язку між фізико-хімічними параметрами живильного розчину та продуктивністю листових овочевих культур у гідропонних системах.

Об'єктом досліджень є живильні розчини та листові овочеві культури, що вирощуються у гідропонних системах.

Предметом дослідження є фізико-хімічні параметри живильного розчину – рН, загальна мінералізація, засоленість, електропровідність, концентрація азоту, фосфатів і калію та їх вплив на продуктивність овочевих культур.

Гіпотеза полягає в тому, що оптимізація фізико-хімічних параметрів живильного розчину в гідропонних системах забезпечує покращення умов мінерального живлення рослин, сприяє підвищенню інтенсивності росту та забезпечує зростання врожайності овочевих культур порівняно з вирощуванням без використання збалансованого живильного середовища.

Завдання дослідження:

- 1) провести системний аналіз наукових джерел щодо впливу фізико-хімічних факторів водного середовища на продуктивність рослин у гідропонних системах;
- 2) розробити методичний підхід до комплексної оцінки фізико-хімічних параметрів водних розчинів у гідропонних системах;
- 3) дослідити динаміку змін основних фізико-хімічних показників живильного розчину у процесі вирощування рослин;

- 4) встановити залежності між параметрами водного середовища та продуктивними характеристиками овочевих культур;
- 5) розробити рекомендації щодо оптимізації фізико-хімічного складу живильних розчинів для овочевих культур у гідропонних системах;
- 6) узагальнити результати досліджень та сформувані практичні рекомендації для виробничого використання гідропонних технологій.

Методи дослідження включали аналіз наукової та нормативної літератури, інструментально-лабораторні методи оцінки фізико-хімічних параметрів водних розчинів, кондуктометричні методи визначення якості живильного середовища, статистичне опрацювання результатів та порівняльний аналіз отриманих даних.

Наукова новизна роботи полягає у проведенні комплексної оцінки фізико-хімічних параметрів живильного розчину у гідропонних системах та встановленні їх впливу на продуктивність листового салату, шпинату і петрушки з урахуванням різних рівнів мінерального живлення.

Практична цінність одержаних результатів полягає у можливості використання отриманих даних для оптимізації складу живильних розчинів, удосконалення систем моніторингу якості водного середовища та підвищення ефективності вирощування овочевих культур у тепличних господарствах і гідропонних системах. Отримані результати можуть бути використані виробниками овочевої продукції, фермерськими господарствами та спеціалістами аграрної галузі для забезпечення стабільної врожайності, економного використання водних ресурсів і підвищення якості овочевої продукції.

РОЗДІЛ 1

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ВИКОРИСТАННЯ ГІДРОПОННИХ СИСТЕМ У ВИРОЩУВАННІ ОВОЧЕВИХ КУЛЬТУР

1.1. Сучасний стан та перспективи розвитку гідропонних технологій

Сучасний розвиток аграрного сектору характеризується активним впровадженням інноваційних технологій вирощування рослин, спрямованих на підвищення ефективності виробництва, раціональне використання природних ресурсів та забезпечення продовольчої безпеки населення. Одним із найбільш перспективних напрямів інтенсивного овочівництва є гідропонні технології, які передбачають вирощування рослин без використання ґрунту шляхом забезпечення кореневої системи збалансованими живильними розчинами. Використання гідропоніки дозволяє здійснювати точний контроль умов живлення, водного режиму та мінерального складу середовища, що сприяє підвищенню врожайності та стабільності виробництва овочевої продукції [3, 4].

Ідея вирощування рослин без ґрунту має давнє походження. Перші спроби культивування рослин у водному середовищі описувалися ще в працях учених XVII–XVIII століть, однак наукового обґрунтування гідропонні технології набули лише наприкінці XIX – на початку XX століття після встановлення ролі мінеральних елементів у живленні рослин. Подальший розвиток фізіології рослин та агрохімії дозволив сформулювати сучасні підходи до створення живильних розчинів із контрольованим складом макро- та мікроелементів [5, 6]. У другій половині XX століття гідропоніка почала активно використовуватися у тепличному господарстві, а сьогодні стала одним із найбільш технологічних напрямів сільськогосподарського виробництва [5].

Сучасний стан розвитку гідропонних технологій у світі свідчить про стрімке розширення їх практичного застосування. Особливо активно гідропонне овочівництво розвивається у країнах із дефіцитом орних земель та водних ресурсів, таких як Нідерланди, Японія, Ізраїль, США та держави

Близького Сходу. У цих країнах гідропонні системи використовуються як у великих промислових тепличних комплексах, так і у вертикальних фермах, де процеси вирощування максимально автоматизовані. Широке впровадження комп'ютеризованого контролю мікроклімату, освітлення та складу живильного середовища дозволяє забезпечувати високу продуктивність рослин та значно зменшувати вплив погодних факторів на результати виробництва [7, 8].

Важливою перевагою гідропонних систем є суттєве скорочення витрат води порівняно з традиційним ґрунтовим землеробством. У більшості сучасних установок вода циркулює у замкненому циклі, що дає змогу повторно використовувати живильні розчини та мінімізувати втрати внаслідок випаровування чи інфільтрації. За даними багатьох досліджень, економія водних ресурсів може становити від 50 до 90 %, що робить гідропоніку особливо актуальною в умовах кліматичних змін та дефіциту прісної води. Одночасно зменшується потреба у використанні земельних площ, оскільки вирощування може здійснюватися у багаторушних конструкціях або у приміщеннях, непридатних для традиційного землеробства.

Суттєвою перевагою гідропонного вирощування є можливість точного регулювання мінерального живлення рослин. На відміну від ґрунтового середовища, де доступність поживних речовин залежить від численних фізичних, хімічних і біологічних факторів, у гідропонних системах склад живильного розчину можна оперативно коригувати відповідно до потреб конкретної культури та фази її розвитку. Це забезпечує оптимальне засвоєння азоту, фосфору, калію та інших елементів живлення, сприяє активізації фізіологічних процесів і позитивно впливає на врожайність та якість продукції [9, 10].

Сучасні гідропонні системи представлені різноманітними технологічними рішеннями. Найбільш поширеними є системи поживного шару (NFT), установки краплинного зрошення із субстратним вирощуванням, системи глибоководної культури (DWC) та аеропонні комплекси. Кожна з них має певні конструктивні особливості та сферу застосування. Наприклад, NFT-системи

широко використовуються для вирощування зеленних культур завдяки безперервному руху тонкого шару живильного розчину вздовж кореневої системи. Аеропонні установки характеризуються високим рівнем аерації коренів і дозволяють отримувати інтенсивний ріст рослин, проте потребують складнішого технічного обслуговування та вищих енергетичних витрат.

В Україні гідропонні технології також поступово набувають поширення, особливо у тепличному овочівництві та виробництві зеленних культур. Інтерес до безгрунтового вирощування зумовлений необхідністю підвищення продуктивності аграрного виробництва, скороченням витрат води та можливістю стабільного забезпечення населення свіжою продукцією протягом року. Однак рівень впровадження гідропоніки поки що поступається провідним країнам світу, що пов'язано з високою вартістю обладнання, потребою у спеціалізованих знаннях та залежністю від енергетичних ресурсів [6, 7].

Незважаючи на численні переваги, гідропонні системи мають певні обмеження. Одним із ключових факторів є висока чутливість рослин до змін фізико-хімічних характеристик живильного середовища. Порушення оптимального рівня рН, електропровідності чи концентрації поживних речовин може швидко спричинити розвиток стресових станів, погіршення росту та зниження врожайності. Саме тому контроль якості живильного розчину є обов'язковою умовою ефективного функціонування гідропонних систем. Особливого значення набуває моніторинг концентрації макроелементів, засоленості та мінералізації водного середовища, оскільки саме ці показники визначають інтенсивність мінерального живлення рослин.

Перспективи розвитку гідропонних технологій пов'язані насамперед із цифровізацією та автоматизацією виробництва. У сучасних тепличних комплексах усе ширше застосовуються сенсорні системи контролю рН, електропровідності та температури, автоматизоване дозування добрив і програмне управління живильними режимами. Активно розвиваються вертикальні ферми та системи контрольованого середовища, де поєднуються гідропоніка, LED-освітлення та технології штучного інтелекту. Такий підхід забезпечує максимальну ефективність використання ресурсів

і дозволяє отримувати високоякісну продукцію незалежно від сезонних або кліматичних умов [10, 11].

Таким чином, гідропонні технології є одним із найбільш перспективних напрямів сучасного овочівництва, що поєднує високий рівень продуктивності, ресурсозбереження та екологічну ефективність. Подальший розвиток безґрунтових систем вирощування пов'язаний із удосконаленням методів контролю фізико-хімічних параметрів живильного середовища, автоматизацією технологічних процесів та пошуком оптимальних режимів мінерального живлення для різних овочевих культур. Саме тому дослідження параметрів живильних розчинів та їх впливу на продуктивність рослин є важливим і актуальним напрямом сучасної аграрної науки.

1.2. Роль фізико-хімічних параметрів живильного розчину в гідропонних системах

Ефективність функціонування гідропонних систем значною мірою визначається якістю живильного розчину, який у безґрунтовому вирощуванні виконує роль основного середовища забезпечення рослин водою, елементами живлення та умовами для розвитку кореневої системи. На відміну від традиційного ґрунтового землеробства, де ґрунт частково компенсує коливання вмісту поживних речовин і стабілізує фізико-хімічні умови, у гідропонних системах будь-які зміни складу живильного середовища безпосередньо впливають на фізіологічний стан рослин. Саме тому контроль фізико-хімічних параметрів живильного розчину є одним із ключових чинників забезпечення високої продуктивності та стабільності гідропонного виробництва [8, 12].

Живильний розчин являє собою водне середовище, що містить необхідні макро- та мікроелементи у доступній для рослин формі. Його склад формується з урахуванням біологічних особливостей культури, стадії розвитку рослин та технологічних особливостей системи вирощування. У сучасних гідропонних установках основними контрольованими показниками є кислотність середовища

(рН), електропровідність, загальна мінералізація, засоленість та концентрація поживних елементів. Оптимальне поєднання цих характеристик забезпечує нормальне функціонування кореневої системи та ефективне використання мінерального живлення [13].

Одним із найбільш важливих фізико-хімічних параметрів живильного розчину є рН, який характеризує кислотність або лужність середовища. Значення рН визначає доступність поживних речовин для рослин та інтенсивність процесів їх поглинання кореневою системою. Відомо, що більшість овочевих культур у гідропонних умовах найкраще розвиваються при слабнокислому середовищі з рН у межах 5,5–6,5. За таких умов забезпечується максимальна доступність азоту, фосфору, калію та більшості мікроелементів. Водночас відхилення від оптимальних значень можуть суттєво порушувати живлення рослин. Надто кисле середовище здатне спричиняти токсичну дію окремих елементів, тоді як підвищення рН часто супроводжується утворенням нерозчинних сполук та зниженням засвоєння фосфору, заліза і марганцю [14, 15].

Дослідження свідчать, що рН живильного розчину є динамічним показником, який змінюється під впливом процесів поглинання іонів рослинами, біохімічних реакцій та складу води. У процесі росту культури коренева система може змінювати кислотність середовища залежно від співвідношення поглинання катіонів та аніонів. Саме тому сучасні гідропонні системи часто оснащуються автоматизованими системами контролю рН, які забезпечують стабільність живильного середовища та мінімізують ризик виникнення стресових умов для рослин.

Іншим важливим показником є електропровідність живильного розчину, яка відображає загальну концентрацію розчинених солей та опосередковано характеризує рівень мінерального живлення. Електропровідність вимірюється у мікросіменсах або мілісіменсах на сантиметр і широко використовується як оперативний індикатор складу живильного середовища. Підвищення електропровідності свідчить про зростання концентрації поживних речовин,

однак надмірні значення можуть призводити до осмотичного стресу та пригнічення ростових процесів. За низької електропровідності, навпаки, виникає дефіцит елементів живлення, що супроводжується уповільненням росту та зниженням продуктивності рослин [16, 17].

Для зеленних овочевих культур, зокрема салату, шпинату та петрушки, оптимальні показники електропровідності зазвичай знаходяться у межах 1,5–2,5 мСм/см, хоча конкретні значення можуть змінюватися залежно від сорту та фази розвитку рослин. На ранніх етапах вегетації культури потребують менш концентрованих живильних розчинів, тоді як у період активного росту потреба в елементах живлення суттєво зростає. Тому підтримання оптимального рівня електропровідності є важливою умовою формування високої врожайності та запобігання порушенням мінерального живлення [3, 5].

Важливу роль у гідропонному вирощуванні відіграють показники загальної мінералізації та засоленості живильного розчину. Загальна мінералізація характеризує сумарний вміст усіх розчинених речовин у водному середовищі, а засоленість відображає концентрацію солей, що визначають осмотичні властивості розчину. Помірний рівень мінералізації є необхідним для забезпечення рослин поживними речовинами, проте надлишок солей може негативно впливати на кореневу систему. Висока засоленість призводить до утруднення поглинання води, розвитку осмотичного стресу та накопичення токсичних концентрацій окремих іонів. У результаті спостерігається пригнічення фотосинтетичної активності, зниження інтенсивності росту та погіршення якості продукції [18, 19].

Особливого значення у складі живильного розчину набуває баланс макроелементів, насамперед азоту, фосфору та калію, які є основою мінерального живлення рослин. Азот забезпечує формування вегетативної маси та входить до складу білків, амінокислот і хлорофілу. Його нестача призводить до пригнічення росту та пожовтіння листків, тоді як надлишок може спричиняти надмірне наростання зеленої маси та зниження стійкості рослин до стресів. Фосфор бере участь в енергетичному обміні та розвитку кореневої системи, а

калій регулює водний режим, ферментативну активність і стійкість рослин до несприятливих факторів середовища. Саме збалансоване співвідношення цих елементів визначає ефективність живильного розчину та продуктивність культур.

Наукові дослідження підтверджують, що потреба рослин у поживних речовинах є змінною протягом онтогенезу. У різні фази розвитку культури потребують неоднакового співвідношення елементів живлення, що зумовлює необхідність коригування складу живильного розчину. Для молодих рослин характерна підвищена потреба у фосфорі для формування кореневої системи, тоді як у період активного наростання біомаси зростає роль азотного живлення. Недотримання оптимального співвідношення елементів може призводити до порушення обміну речовин і зниження врожайності [10, 13].

У сучасних гідропонних системах контроль фізико-хімічних параметрів дедалі частіше здійснюється із застосуванням автоматизованих технологій. Використання сенсорів, комп'ютерних систем моніторингу та автоматичного дозування добрив дозволяє підтримувати стабільність живильного середовища в режимі реального часу. Такий підхід сприяє більш ефективному використанню ресурсів, мінімізує людський фактор та забезпечує високу повторюваність результатів вирощування. Особливо актуальним це є для промислових тепличних комплексів і вертикальних ферм, де навіть незначні коливання фізико-хімічних показників можуть спричинити суттєві економічні втрати.

Водночас роль фізико-хімічних параметрів живильного розчину виходить за межі забезпечення лише продуктивності рослин. Від якості живильного середовища значною мірою залежить і безпечність овочевої продукції. Надмірне накопичення окремих сполук або порушення режиму мінерального живлення можуть впливати на біохімічний склад рослин та змінювати вміст певних речовин у готовій продукції. Саме тому сучасні підходи до гідропонного вирощування передбачають не лише отримання високих урожаїв, а й забезпечення належної якості та екологічної безпечності овочевої продукції [19, 20].

Таким чином, фізико-хімічні параметри живильного розчину є визначальним фактором успішного функціонування гідропонних систем. Оптимізація кислотності, електропровідності, мінералізації, засоленості та мінерального складу середовища забезпечує ефективне живлення рослин, сприяє підвищенню врожайності та покращенню якості продукції. Подальші дослідження у цьому напрямі мають важливе значення для удосконалення гідропонних технологій та розроблення науково обґрунтованих режимів живлення овочевих культур.

1.3. Вплив мінерального живлення на продуктивність овочевих культур в гідропонних системах

Мінеральне живлення є одним із ключових факторів, що визначають ефективність вирощування овочевих культур у гідропонних системах. У безґрунтових технологіях саме живильний розчин виступає єдиним джерелом макро- та мікроелементів, необхідних для забезпечення фізіологічних процесів рослин. На відміну від традиційного землеробства, де ґрунт певною мірою виконує функцію буферного середовища та джерела поживних речовин, у гідропоніці ефективність росту і розвитку культур повністю залежить від збалансованості мінерального складу живильного середовища. Саме тому питання оптимізації мінерального живлення розглядається як одна з центральних проблем сучасних гідропонних технологій [21, 22].

Мінеральне живлення забезпечує надходження до рослин хімічних елементів, необхідних для формування клітинних структур, синтезу органічних речовин та підтримання енергетичного обміну. Для нормального росту рослини потребують комплексного надходження макроелементів, серед яких провідне значення мають азот, фосфор і калій, а також низки мікроелементів — кальцію, магнію, сірки, заліза, марганцю, цинку, міді, бору та молібдену. Від рівня забезпечення цими елементами залежить інтенсивність фотосинтезу, формування кореневої системи, накопичення біомаси та продуктивність культур [21, 23].

У науковій літературі широко висвітлюється роль азоту як одного з найважливіших елементів живлення рослин. Азот входить до складу амінокислот, білків, нуклеїнових кислот та хлорофілу, тому його забезпеченість безпосередньо впливає на швидкість ростових процесів і формування вегетативної маси. Для зеленних культур, таких як листовий салат, шпинат і петрушка, достатній рівень азотного живлення має особливо важливе значення, оскільки саме листкова поверхня є основною товарною частиною продукції. За дефіциту азоту рослини характеризуються уповільненим ростом, блідим забарвленням листків та зниженням інтенсивності фотосинтезу. Водночас надлишкове азотне живлення може спричиняти надмірне наростання зеленої маси, погіршення механічної міцності тканин та накопичення нітратів у продукції [4, 24, 25].

Не менш важливу роль у гідропонному вирощуванні відіграє фосфор, який бере участь у процесах енергетичного обміну та функціонуванні клітинних мембран. Фосфор необхідний для формування потужної кореневої системи, активізації процесів поділу клітин та синтезу органічних сполук. У гідропонних системах його доступність значною мірою залежить від кислотності живильного розчину, оскільки за відхилення рН від оптимальних значень можуть утворюватися малорозчинні сполуки фосфатів. Дефіцит фосфору часто проявляється уповільненням росту рослин, затримкою розвитку та погіршенням формування коренів, що негативно позначається на загальній продуктивності культур [26, 27].

Калій є одним із найважливіших регуляторів фізіологічних процесів у рослинах. Він бере участь у регуляції водного балансу, роботі протоків, ферментативних реакціях та транспорті вуглеводів. Умови гідропонного вирощування вимагають особливої уваги до калійного живлення, оскільки цей елемент суттєво впливає на стійкість рослин до стресових факторів та ефективність використання води. Оптимальне забезпечення калієм сприяє формуванню міцних тканин, покращує якість продукції та підвищує її лежкість. Недостатнє надходження калію може призводити до порушення водного режиму, розвитку некротичних уражень листків та зниження врожайності [25, 27].

У сучасних дослідженнях велика увага приділяється не лише абсолютному вмісту окремих елементів, а й їх співвідношенню у живильному розчині. Встановлено, що ефективність мінерального живлення визначається балансом між азотом, фосфором та калієм, а також взаємодією цих елементів із кальцієм, магнієм та мікроелементами. Порушення оптимального співвідношення може спричиняти антагоністичні ефекти, за яких надлишок одного елемента обмежує засвоєння іншого. Наприклад, високі концентрації калію здатні пригнічувати надходження магнію та кальцію, тоді як надлишкове азотне живлення може знижувати ефективність використання калію. Саме тому сучасні підходи до гідропонного вирощування базуються на принципі збалансованого живлення.

Особливістю гідропонних систем є можливість оперативного регулювання складу живильного середовища відповідно до фаз росту рослин. На початкових етапах розвитку культури потребують помірної концентрації поживних речовин та достатнього забезпечення фосфором для стимуляції коренеутворення. У фазі інтенсивного росту листкової маси суттєво зростає потреба в азоті, який забезпечує активний синтез білків і розвиток фотосинтетичного апарату. Наприкінці вегетації важливого значення набуває калійне живлення, що сприяє накопиченню сухої речовини та покращенню товарних якостей продукції. Такий диференційований підхід дозволяє максимально реалізувати потенціал культури та підвищити ефективність використання добрив [25, 28].

Наукові дослідження підтверджують, що оптимізація мінерального живлення здатна суттєво підвищувати продуктивність овочевих культур у гідропонних системах. Для зеленних культур збалансоване живлення забезпечує інтенсивніше формування листкової поверхні, підвищення середньої маси рослин та збільшення врожайності на одиницю площі. Особливо помітний ефект спостерігається за використання комплексних добрив, які містять азот, фосфор і калій у збалансованому співвідношенні. Застосування таких добрив дозволяє підтримувати стабільність живильного середовища та забезпечувати рослини необхідними елементами протягом усього періоду вирощування.

Разом із позитивним впливом мінерального живлення на продуктивність у літературі наголошується на необхідності запобігання надлишковому внесенню добрив. Підвищення концентрації солей у живильному розчині може призводити до збільшення електропровідності та засоленості, що негативно впливає на кореневу систему рослин. Осмотичний стрес унаслідок надмірної концентрації поживних речовин супроводжується погіршенням поглинання води, пригніченням фотосинтезу та накопиченням токсичних концентрацій окремих іонів. У таких умовах продуктивність культур знижується, а якість продукції може погіршуватися [29, 30].

Особливої актуальності набуває питання впливу мінерального живлення на екологічну безпечність овочевої продукції. Інтенсивне використання азотних добрив здатне спричиняти накопичення нітратів у зеленних культурах, що є небажаним із санітарно-гігієнічної точки зору. Тому сучасні технології гідропонного вирощування орієнтовані не лише на отримання високої врожайності, а й на забезпечення збалансованого живлення, яке дозволяє підтримувати оптимальні показники якості та безпечності продукції.

Сучасний розвиток гідропонних технологій тісно пов'язаний із автоматизацією процесів мінерального живлення. Використання електронних систем контролю електропровідності та автоматичного дозування добрив дозволяє підтримувати стабільний склад живильного середовища та швидко реагувати на зміни потреб рослин. Такі системи забезпечують точне управління живленням, скорочують витрати добрив та знижують ризик технологічних помилок [30].

Таким чином, мінеральне живлення є одним із визначальних факторів продуктивності овочевих культур у гідропонних системах. Раціональне поєднання макро- і мікроелементів, підтримання оптимальної концентрації поживних речовин та своєчасне коригування складу живильного розчину створюють передумови для активного росту рослин, підвищення врожайності та отримання якісної овочевої продукції. Подальше вдосконалення систем мінерального живлення має важливе значення для розвитку високоефективних і ресурсозберігаючих технологій гідропонного овочівництва.

РОЗДІЛ 2

ОРГАНІЗАЦІЯ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ

2.1. Умови проведення експериментальних досліджень

Експериментальні дослідження проводили з метою оцінки впливу фізико-хімічних параметрів живильного розчину на продуктивність овочевих культур у гідропонних системах. Дослідження виконували в умовах контрольованого вирощування зеленних культур із використанням гідропонних установок, що забезпечували стабільне надходження води та елементів мінерального живлення до кореневої системи рослин.

Об'єктом дослідження були живильні розчини та овочеві культури, вирощувані в умовах гідропоніки. Предметом дослідження виступали фізико-хімічні показники живильного середовища, зокрема рН, загальна мінералізація, засоленість, електропровідність, а також концентрація основних макроелементів - азоту, фосфатів і калію.

Для проведення експерименту використовували три окремі гідропонні системи, у яких було закладено три варіанти досліду:

- 1) Контрольний варіант — вода без внесення добрив;
- 2) Варіант із внесенням нітроамофоски у дозі 5 г/10 л води (50 % від рекомендованої норми);
- 3) Варіант із внесенням нітроамофоски у дозі 10 г/10 л води (100 % норми).

У дослідженні використовували комплексне мінеральне добриво нітроамофоска марки 16:16:16, яке містить азот, фосфор і калій у збалансованому співвідношенні. Вибір цього добрива обумовлений його широким використанням у сучасному овочівництві та високою ефективністю для зеленних культур (рис. 2.1).

Досліджуваними культурами були:

- листовий салат;
- шпинат;
- петрушка.



Рис. 2.1 – Три окремі гідропонні системи, у яких було закладено три варіанти досліду

Вибір культур пояснюється їх широким використанням у гідропонних системах, коротким вегетаційним періодом та високою чутливістю до змін фізико-хімічних параметрів живильного середовища.

Під час проведення досліджень підтримували стабільні умови вирощування рослин. Температурний режим відповідав оптимальним показникам для зеленних культур і становив у середньому 20 – 24 °C у денний період та 16 – 18 °C у нічний час. Відносна вологість повітря підтримувалася на рівні 60 – 75 %. Рослини

забезпечували достатнім рівнем освітлення, необхідним для активного проходження фотосинтетичних процесів та формування вегетативної маси.

Живильний розчин циркулював у системі постійно, що забезпечувало рівномірне надходження води та елементів живлення до кореневої системи рослин. У процесі вирощування проводили регулярний контроль фізико-хімічних показників водного середовища та спостереження за ростом і розвитком культур.

Тривалість експерименту відповідала повному вегетаційному періоду досліджуваних культур. Після завершення вегетації визначали біометричні показники рослин та оцінювали їх продуктивність.

Таким чином, організація експерименту дозволила оцінити вплив різних рівнів мінерального живлення на фізико-хімічні властивості живильного розчину та продуктивність овочевих культур у гідропонних системах.

2.2. Методика визначення фізико-хімічних показників та продуктивності культур

Для оцінки ефективності різних варіантів живильного середовища використовували комплекс інструментально-лабораторних методів дослідження фізико-хімічних параметрів водних розчинів та методи визначення продуктивності овочевих культур.

Визначення фізико-хімічних показників живильного розчину проводили потенціометричними методами із використанням сучасних вимірювальних приладів - кондуктометрів (рис. 2.2). У всіх варіантах дослідів визначали:

- рН живильного розчину;
- загальну мінералізацію;
- засоленість;
- електропровідність;
- концентрацію азоту;
- концентрацію фосфатів;
- концентрацію калію.

Водневий показник (pH) визначали потенціометричним методом за допомогою рН-метра. Отримані результати дозволяли оцінити кислотність живильного середовища та встановити його відповідність оптимальним умовам вирощування овочевих культур.

Електропровідність розчину визначали за допомогою кондуктометра. Показник електропровідності характеризує сумарну концентрацію розчинених солей у живильному середовищі та є одним із основних індикаторів рівня мінерального живлення рослин.

Загальну мінералізацію та засоленість визначали на основі кондуктометричних вимірювань. Отримані дані використовували для оцінки ступеня накопичення солей у водному середовищі та можливого ризику розвитку осмотичного стресу у рослин.

Концентрацію макроелементів – азоту, фосфатів і калію – визначали лабораторними методами аналізу водних розчинів. Отримані результати порівнювали з нормативними значеннями відповідно до вимог чинних стандартів та рекомендацій щодо використання води у гідропонних системах [31-34].

Оцінювання продуктивності овочевих культур проводили після завершення вегетаційного періоду. Рослини збирали окремо за кожним варіантом досліду та здійснювали визначення їх біомаси.

Для визначення врожайності використовували електронні ваги високої точності (рис. 2.3). У процесі дослідження визначали:

- середню масу однієї рослини;
- урожайність у перерахунку на одиницю площі (кг/м²).

Середню масу рослин розраховували шляхом зважування отриманої зеленої маси та подальшого визначення середнього значення. Урожайність визначали методом перерахунку отриманої біомаси на площу вирощування.

Для забезпечення достовірності результатів усі вимірювання проводили у кількох повторностях, після чого визначали середні значення показників. Отримані результати піддавали статистичному опрацюванню та порівняльному аналізу.

Методика дослідження дозволила комплексно оцінити вплив різних концентрацій мінерального живлення на фізико-хімічні параметри живильного

розчину та продуктивність листового салату, шпинату і петрушки в умовах гідропонного вирощування.



Рис. 2.2 – Кондуктометри для визначення фізико-хімічних показників живильного розчину в гідропонних системах



Рис. 2.3 – Електронні ваги високої точності для визначення маси та урожайності культур в гідропонних системах

РОЗДІЛ 3

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ АНАЛІЗ

3.1. Аналіз результатів дослідження фізико-хімічних показників живильного розчину

У результаті проведених лабораторних досліджень встановлено, що внесення мінеральних добрив суттєво впливало на фізико-хімічні характеристики живильного розчину у гідропонних системах. Отримані результати вимірювання якості живильного розчину в гідропонних системах наведено у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

Результати лабораторних досліджень визначення якості живильного розчину в гідропонній системі

Варіант досліджу	pH	Загальна мінералізація, мг/дм ³	Засоленість, %	Електропровідність, $\mu\text{S}/\text{cm}$	Азот, мг/л	Фосфати, мг/л	Калій, мг/л
1. Контроль (без добрив)	7,2	410	0,04	690	11	0,7	4
2. Нітроамофоска 50%	6,7	980	0,11	1480	39	2,8	13
3. Нітроамофоска 100%	6,3	1790	0,21	2170	76	4,3	19
<i>Нормативне значення (Постанова КМУ №766 від 02.09.2020, ДСТУ EN 13652:2015)</i>	5,5–8,0	<3000	<0,3	<2500	<200	<15	<300

Результати досліджень показали, що у контрольному варіанті без внесення добрив pH живильного середовища становив 7,2. За внесення

нітроамофоски спостерігалось поступове зниження показника кислотності: у варіанті з 50 % норми добрив рН становив 6,7, а у варіанті зі 100 % нормою — 6,3. Отримані значення перебували у межах оптимальних показників для вирощування зеленних культур у гідропонних системах.

Зниження рН пояснюється підвищенням концентрації мінеральних солей та активізацією процесів іонного обміну у водному середовищі. Слабокисла реакція живильного розчину сприяла покращенню доступності основних елементів живлення для рослин [6].

Дослідження показали значне зростання загальної мінералізації та електропровідності живильного розчину залежно від концентрації добрив. У контрольному варіанті загальна мінералізація становила 410 мг/дм³, тоді як у варіанті зі 100 % нормою добрив цей показник зріс до 1790 мг/дм³.

Подібна тенденція спостерігалася і щодо електропровідності. У контрольному варіанті електропровідність становила 690 $\mu\text{S}/\text{cm}$, у варіанті з 50 % норми добрив – 1480 $\mu\text{S}/\text{cm}$, а при використанні повної норми нітроамофоски – 2170 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Підвищення електропровідності свідчить про збільшення концентрації поживних елементів у живильному середовищі. Водночас отримані показники не перевищували допустимих нормативних значень для вирощування зеленних культур.

Засоленість живильного розчину також зростала зі збільшенням концентрації добрив. У контрольному варіанті показник становив 0,04 %, у варіанті з 50 % норми – 0,11 %, а у варіанті зі 100 % нормою добрив – 0,21 %. Незважаючи на зростання засоленості, усі значення залишалися нижчими за гранично допустимі норми.

Аналіз концентрації макроелементів показав суттєве підвищення вмісту азоту, фосфатів та калію у варіантах із внесенням нітроамофоски.

Концентрація азоту зростає:

- від 11 мг/л у контрольному варіанті;
- до 39 мг/л при 50 % нормі добрив;

- до 76 мг/л при 100 % нормі добрив.

Вміст фосфатів збільшився від 0,7 мг/л у контролі до 4,3 мг/л у варіанті з максимальною концентрацією добрив.

Концентрація калію підвищилася від 4 до 19 мг/л залежно від рівня мінерального живлення.

Отримані результати свідчать про пряму залежність між дозою внесення мінеральних добрив та концентрацією поживних елементів у живильному розчині.

Таким чином, використання нітроамофоски дозволило створити оптимальні фізико-хімічні умови для вирощування овочевих культур у гідропонних системах, що позитивно вплинуло на подальший ріст і продуктивність рослин.

На рис. 3.1 представлено результати дослідження кислотності живильного розчину в гідропонній системі залежно від концентрації мінеральних добрив. Показник рН є одним із найважливіших фізико-хімічних параметрів живильного середовища, оскільки саме він визначає доступність елементів живлення для рослин та ефективність їх засвоєння кореневою системою.

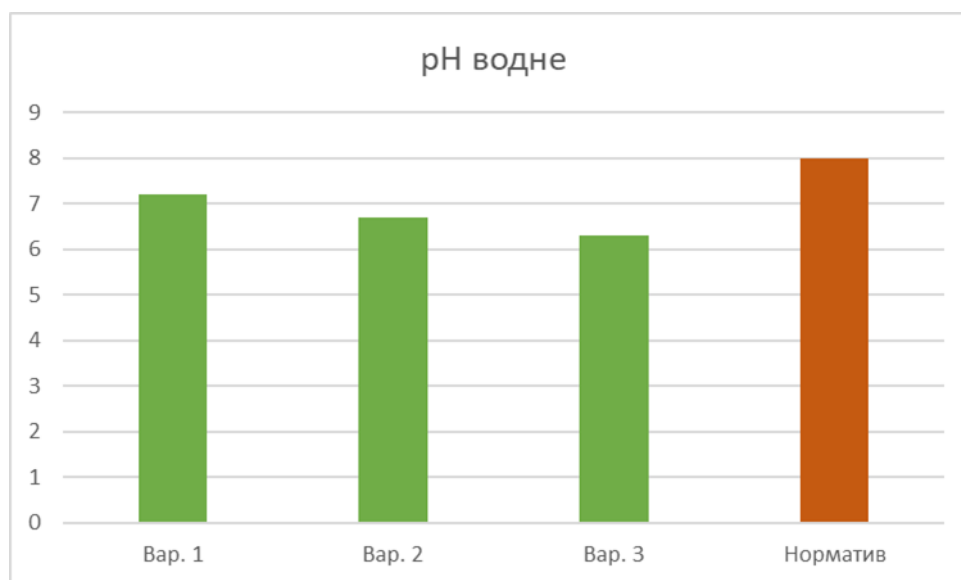


Рис. 3.1 – Результати дослідження кислотності живильного розчину в гідропонній системі

У процесі дослідження було встановлено, що внесення нітроамофоски суттєво впливало на кислотність живильного розчину. У контрольному варіанті без внесення добрив показник рН становив 7,2, що відповідає нейтральній реакції середовища. За таких умов частина поживних елементів може засвоюватися рослинами менш ефективно.

У варіанті з використанням 50 % норми нітроамофоски показник рН знизився до 6,7. Це свідчить про підкислення живильного середовища внаслідок розчинення мінеральних солей та збільшення концентрації іонів у водному розчині.

Найнижчий показник рН спостерігався у варіанті зі 100 % нормою добрив – 6,3. Саме такий рівень кислотності є найбільш сприятливим для вирощування зеленних культур у гідропонних системах, оскільки забезпечує оптимальну доступність азоту, фосфору, калію та інших поживних елементів.

Отримані результати свідчать про те, що зі збільшенням концентрації добрив відбувалося поступове зниження рН живильного розчину. Це пояснюється активізацією процесів іонного обміну та підвищенням концентрації мінеральних компонентів у водному середовищі.

Оптимальний рівень рН для більшості зеленних культур у гідропоніці знаходиться в межах 5,5–6,5. Саме в цьому діапазоні забезпечується найбільш ефективно засвоєння макро- та мікроелементів кореневою системою рослин. Якщо рН виходить за межі оптимальних значень, можуть виникати порушення живлення рослин, пригнічення росту та зниження продуктивності.

У проведеному дослідженні всі отримані значення рН залишалися в допустимих межах і не створювали негативного впливу на розвиток культур. Навпаки, слабокисла реакція живильного середовища у варіантах із внесенням добрив сприяла покращенню фізіологічних процесів у рослин та активнішому формуванню зеленої маси.

Таким чином, результати дослідження підтверджують важливість постійного контролю кислотності живильного розчину в гідропонних системах

та доводять, що використання нітроамофоски дозволяє створити оптимальні умови для росту і розвитку овочевих культур.

На рис. 3.2 представлено зміну рівня мінералізації живильного розчину залежно від концентрації мінеральних добрив у гідропонній системі. Даний показник характеризує сумарний вміст розчинених мінеральних речовин у водному середовищі та є важливим критерієм оцінки якості живильного розчину.

У процесі дослідження встановлено чітку тенденцію до зростання загальної мінералізації зі збільшенням концентрації нітроамофоски. У контрольному варіанті без внесення добрив показник мінералізації становив 410 мг/дм³. Такий рівень свідчить про низький вміст розчинених поживних елементів у воді та недостатнє мінеральне забезпечення рослин.

У варіанті з використанням 50 % норми добрив загальна мінералізація зростає до 980 мг/дм³. Це пояснюється надходженням у живильний розчин значної кількості макроелементів – азоту, фосфору та калію, що входять до складу нітроамофоски.

Найвищий показник було зафіксовано у варіанті зі 100 % нормою добрив – 1790 мг/дм³. Отримане значення свідчить про високий рівень насичення живильного середовища мінеральними компонентами, необхідними для інтенсивного росту рослин.

Зростання мінералізації позитивно вплинуло на розвиток овочевих культур, оскільки підвищення концентрації поживних речовин забезпечувало активніше засвоєння елементів живлення кореневою системою. Саме у варіантах із вищими показниками мінералізації спостерігалися найкращі результати росту та врожайності листового салату, шпинату і петрушки.

Водночас надмірна мінералізація може бути небезпечною для рослин, оскільки надлишок солей у живильному середовищі здатний викликати осмотичний стрес, погіршення водного обміну та пригнічення ростових процесів [11, 20]. Проте у проведеному дослідженні всі отримані значення залишалися в допустимих межах для гідропонного вирощування зеленних культур.

Отримані результати підтверджують, що використання комплексного мінерального добрива дозволяє ефективно регулювати рівень мінералізації

живильного розчину та створювати оптимальні умови для росту і розвитку рослин у гідропонних системах.

Таким чином, аналіз графіка показав пряму залежність між концентрацією мінеральних добрив і рівнем загальної мінералізації живильного середовища, що безпосередньо впливало на продуктивність досліджуваних культур.

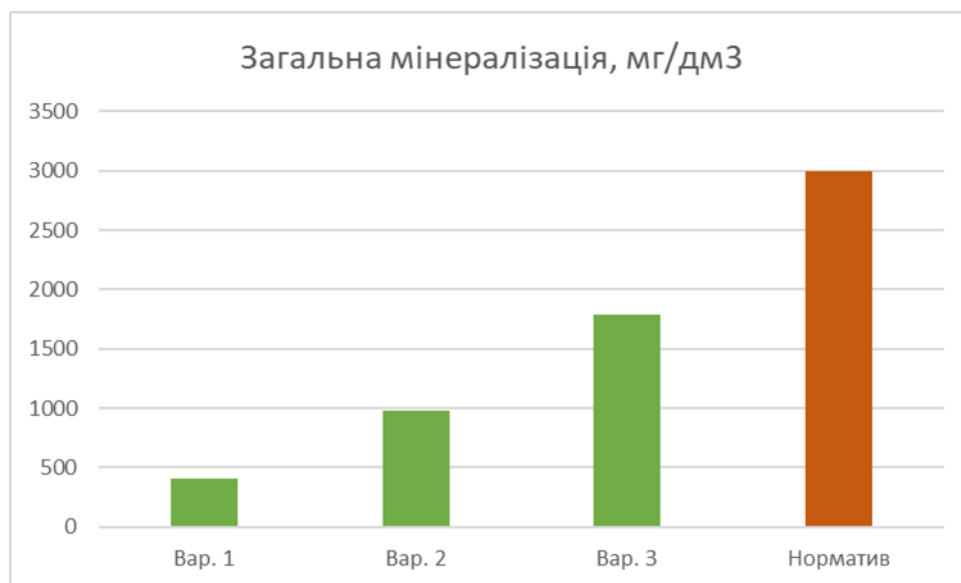


Рис. 3.2 – Результати загальної мінералізації живильного розчину в гідропонній системі

На рисунках 3.3 та 3.4 представлено результати дослідження електропровідності та засоленості живильного розчину залежно від концентрації мінеральних добрив у гідропонній системі. Ці показники є надзвичайно важливими, оскільки вони характеризують рівень мінерального живлення рослин та концентрацію розчинених солей у водному середовищі.

Електропровідність живильного розчину є одним із основних індикаторів концентрації поживних речовин [10, 14]. Вона відображає здатність розчину проводити електричний струм завдяки наявності розчинених іонів макро- та мікроелементів. У контрольному варіанті без внесення добрив електропровідність становила 690 $\mu\text{S}/\text{cm}$, що свідчило про низький вміст поживних речовин у воді.



Рис. 3.3 – Результати дослідження засоленості живильного розчину в гідропонній системі



Рис. 3.4 – Результати дослідження електропровідності живильного розчину в гідропонній системі

У варіанті з внесенням 50 % норми нітроамофоски показник електропровідності зріс до $1480 \mu\text{S}/\text{cm}$. Це пояснюється збільшенням концентрації азоту, фосфору та калію у живильному середовищі. Найвищий показник спостерігався у варіанті зі 100 % нормою добрив – $2170 \mu\text{S}/\text{cm}$.

Отримане значення перебувало в межах оптимального діапазону для вирощування зеленних культур у гідропонних системах.

Підвищення електропровідності свідчить про покращення мінерального живлення рослин, оскільки коренева система отримувала більшу кількість доступних поживних елементів. Водночас дуже високі показники електропровідності можуть бути небезпечними через ризик розвитку осмотичного стресу та порушення водного обміну рослин. У даному дослідженні всі показники залишалися у допустимих межах.

Разом із електропровідністю досліджували засоленість живильного розчину. У контрольному варіанті вона становила 0,04 %, у варіанті з 50 % норми добрив – 0,11 %, а при внесенні 100 % норми – 0,21 %. Хоча засоленість зростала зі збільшенням концентрації добрив, вона не перевищувала гранично допустимих значень для овочевих культур.

Отримані результати підтверджують, що внесення комплексного мінерального добрива сприяло формуванню оптимального рівня мінерального живлення без надмірного засолення водного середовища.

На рисунках 3.5 і 3.6 представлено результати лабораторного аналізу концентрації основних макроелементів у живильному розчині, а саме азоту та фосфатів. Ці елементи є одними з найважливіших компонентів мінерального живлення рослин та безпосередньо впливають на їх ріст і продуктивність.

Азот відіграє ключову роль у формуванні вегетативної маси рослин, оскільки входить до складу білків, амінокислот, хлорофілу та ферментів. Для зеленних культур достатнє забезпечення азотом є особливо важливим, оскільки саме листкова маса є основною товарною продукцією [1, 8].

У контрольному варіанті концентрація азоту становила 11 мг/л. Це був найнижчий показник серед усіх варіантів досліду, що пояснюється відсутністю мінерального живлення. У варіанті з 50 % норми добрив концентрація азоту збільшилася до 39 мг/л. Найвищий показник було зафіксовано у варіанті зі 100 % нормою нітроамофоски – 76 мг/л.

Підвищення концентрації азоту позитивно вплинуло на інтенсивність росту рослин, формування листкової поверхні та накопичення зеленої маси. Саме у варіантах із підвищеним азотним живленням спостерігалася найвища продуктивність культур.

Фосфор також є важливим елементом живлення, оскільки бере участь у процесах енергетичного обміну, розвитку кореневої системи та формуванні нових клітин [8]. У контрольному варіанті концентрація фосфатів становила 0,7 мг/л. При внесенні 50 % норми добрив цей показник зріс до 2,8 мг/л, а у варіанті зі 100 % нормою добрив – до 4,3 мг/л.

Отримані результати свідчать про пряму залежність між дозою внесення добрив та концентрацією макроелементів у живильному середовищі. Водночас усі показники перебували у межах допустимих нормативів, що підтверджує безпечність використаних концентрацій добрив для гідропонного вирощування.

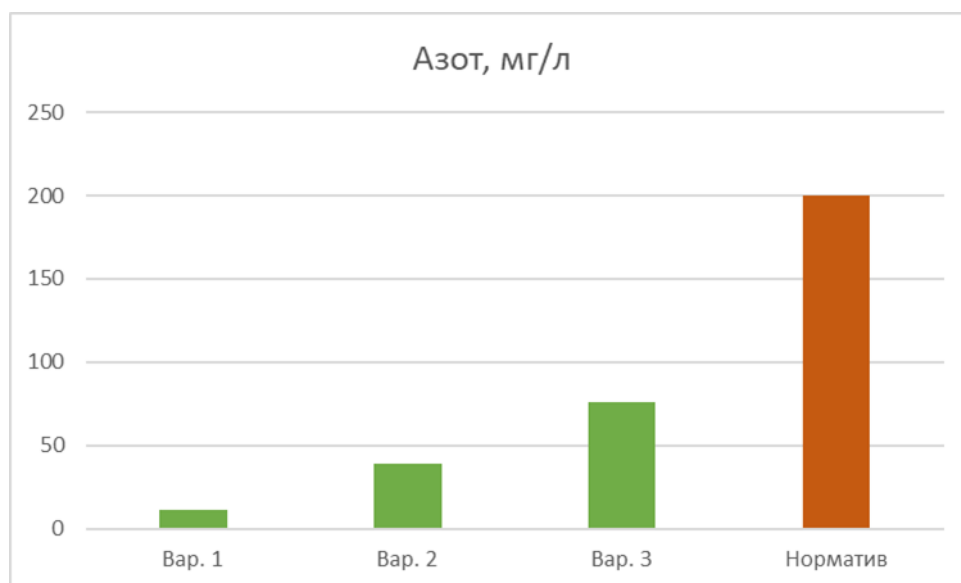


Рис. 3.5 – Результати дослідження вмісту азоту в живильному розчині в гідропонній системі

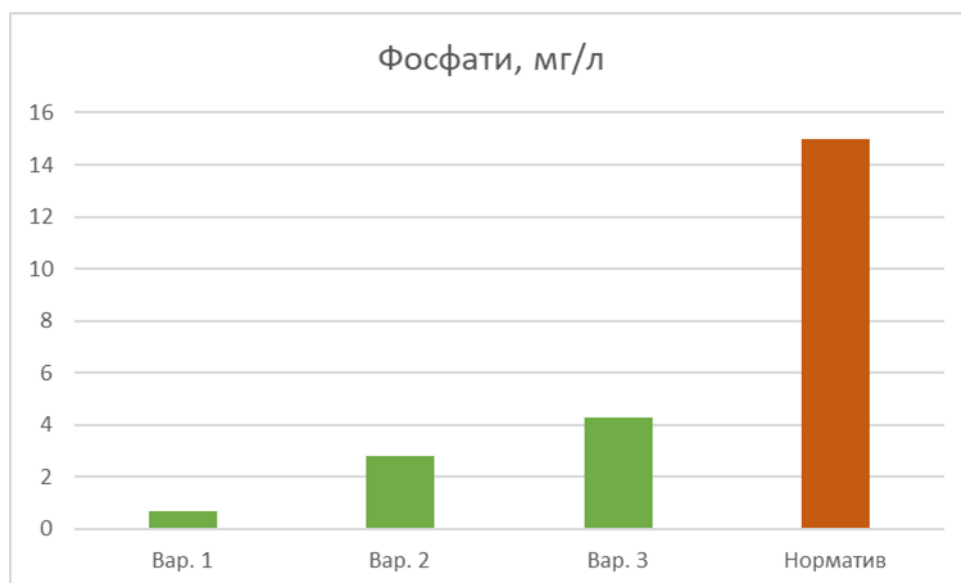


Рис. 3.6 – Результати дослідження вмісту фосфору в живильному розчині в гідропонній системі

На рис. 3.7 наведено результати визначення концентрації калію у живильному розчині. Калій є одним із трьох основних макроелементів, необхідних для нормального росту та розвитку рослин. Він бере участь у регуляції водного режиму, ферментативних процесах, синтезі вуглеводів та підвищує стійкість рослин до стресових факторів.

У контрольному варіанті без внесення добрив концентрація калію становила лише 4 мг/л. Такий рівень був недостатнім для забезпечення інтенсивного росту зеленних культур, що негативно позначалося на їх продуктивності.

У варіанті з використанням 50 % норми нітроамофоски концентрація калію зросла до 13 мг/л. Найвищий показник було зафіксовано у варіанті зі 100 % нормою добрив – 19 мг/л.

Підвищення концентрації калію позитивно вплинуло на фізіологічний стан рослин. Завдяки оптимальному калійному живленню покращувалися процеси транспірації, активізувався транспорт поживних речовин у тканинах рослин та підвищувалася ефективність використання води.

Калій також сприяв формуванню більшої листкової поверхні, підвищенню інтенсивності фотосинтезу та покращенню товарних якостей продукції. Саме у варіантах із вищою концентрацією калію спостерігалися найкращі показники росту та врожайності листового салату, шпинату і петрушки.

Таким чином, результати дослідження підтвердили важливу роль калію у формуванні продуктивності овочевих культур у гідропонних системах та довели ефективність використання комплексного мінерального живлення.

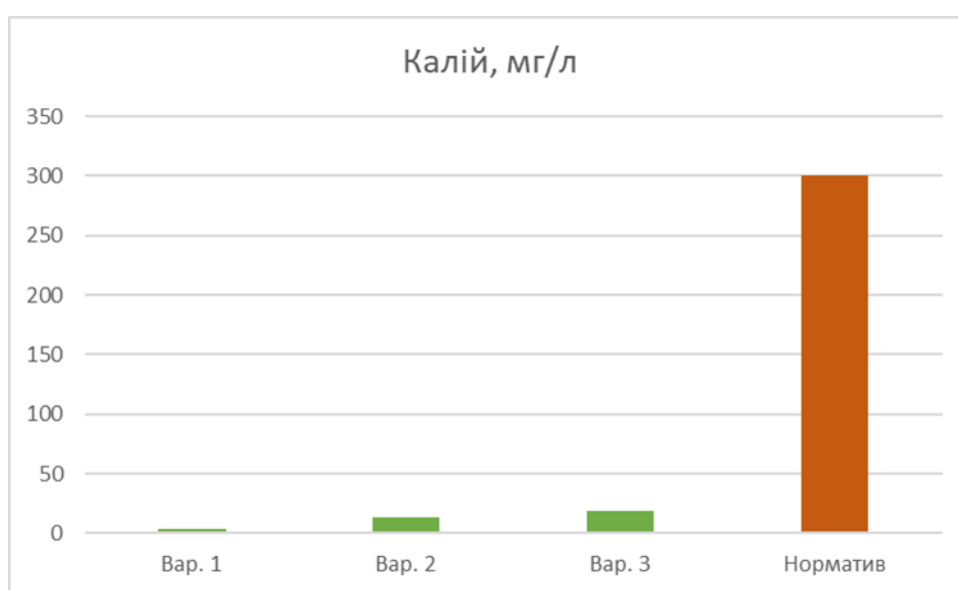


Рис. 3.7 – Результати дослідження вмісту калію в живильному розчині в гідропонній системі

3.2. Вплив складу живильного розчину на ріст і розвиток культур в гідропонних системах

В таблиці 3.2 представлено результати визначення середньої маси однієї рослини залежно від складу живильного розчину. Саме цей показник дозволяє оцінити інтенсивність росту культур та ефективність мінерального живлення у гідропонній системі.

Результати дослідження показали чітку тенденцію до збільшення маси рослин зі зростанням концентрації поживних речовин у живильному середовищі.

Таблиця 3.2

Середня маса овочевих культур залежно від складу живильного розчину

Варіант	Середня маса однієї рослини		
	Листовий салат	Шпинат	Петрушка
Контроль	91–121 г	25–40 г	45–70 г
50% норми добрив	162–192 г	50–75 г	90–130 г
100% норми добрив	220–280 г	81–121 г	139–189 г

Найбільшу продуктивність продемонстрував листовий салат. У контрольному варіанті середня маса однієї рослини становила 91 - 121 г. При використанні 50 % норми нітроамофоски маса збільшилася до 162 - 192 г. Найвищі результати були отримані у варіанті зі 100 % нормою добрив – від 220 до 280 г.

Шпинат також позитивно реагував на покращення мінерального живлення. У контрольному варіанті середня маса рослини становила 45 - 70 г. У варіанті з 50 % нормою добрив показник зріс до 90 - 130 г, а при використанні повної норми нітроамофоски – до 139 - 189 г.

Для петрушки спостерігалася аналогічна закономірність. У контрольному варіанті маса однієї рослини становила 25 - 40 г. За внесення 50 % норми добрив показник зріс до 50–75 г, а у варіанті зі 100 % нормою – до 81 - 121 г.

Отримані результати свідчать про те, що збільшення концентрації поживних елементів у живильному розчині сприяло активізації ростових процесів та накопиченню більшої біомаси рослин.

Особливо важливу роль відігравали оптимальні показники електропровідності, рН та забезпеченість рослин азотом, фосфором і калієм. Саме збалансоване мінеральне живлення забезпечило найкращі умови для росту та розвитку досліджуваних культур.

Таким чином, результати табл. 3.2 підтверджують високу ефективність використання комплексних мінеральних добрив у гідропонних системах та їх позитивний вплив на продуктивність овочевих культур.

В таблиці 3.3 представлено результати дослідження урожайності овочевих культур залежно від складу живильного розчину у гідропонній системі. У ході дослідження було встановлено, що підвищення концентрації мінеральних добрив у живильному середовищі позитивно впливало на врожайність усіх досліджуваних культур. Найнижчі показники спостерігалися у контрольному варіанті без внесення добрив, де рослини отримували недостатню кількість поживних елементів.

Таблиця 3.3

Урожайність овочевих культур залежно від складу живильного розчину

Культура	Варіант		
	Контроль, кг/м ²	50% норми добрив, кг/м ²	100% норми добрив, кг/м ²
Листовий салат	2,10	3,56	4,90
Шпинат	1,49	2,83	4,10
Петрушка	1,02	2,01	3,03

Найвищу врожайність продемонстрував листовий салат. У контрольному варіанті його врожайність становила 2,10 кг/м². При використанні 50 % норми нітроамофоски цей показник зріс до 3,56 кг/м². Найкращі результати були отримані у варіанті зі 100 % нормою добрив, де врожайність досягла 4,90 кг/м².

Таке суттєве збільшення врожайності пояснюється покращенням мінерального живлення рослин. Завдяки достатньому забезпеченню азотом, фосфором і калієм активізувалися процеси фотосинтезу, формування листової поверхні та накопичення зеленої маси [13, 16].

Для шпинату також спостерігалася позитивна динаміка врожайності. У контрольному варіанті вона становила 1,49 кг/м². При внесенні 50 % норми добрив урожайність зросла до 2,88 кг/м², а у варіанті зі 100 % нормою — до 4,10 кг/м².

Підвищення продуктивності шпинату свідчить про високу чутливість цієї культури до рівня мінерального живлення. Оптимальний вміст поживних елементів у живильному розчині забезпечував інтенсивний ріст листкової маси та активний розвиток рослин.

Аналогічна закономірність спостерігалася і для петрушки. У контрольному варіанті врожайність становила 1,02 кг/м². При використанні 50 % норми нітроамофоски показник збільшився до 2,01 кг/м², а у варіанті зі 100 % нормою добрив — до 3,03 кг/м².

Хоча петрушка характеризувалася нижчою врожайністю порівняно з листовим салатом і шпинатом, підвищення концентрації поживних речовин також позитивно вплинуло на її продуктивність.

Аналіз результатів показав, що найбільш ефективним виявився варіант із внесенням повної норми нітроамофоски. Саме за цих умов були створені оптимальні фізико-хімічні параметри живильного розчину — відповідний рівень рН, електропровідності, мінералізації та концентрації макроелементів.

Контрольний варіант показав найнижчу врожайність у всіх культур через недостатню кількість поживних речовин у живильному середовищі. Рослини розвивалися повільніше та формували меншу зелену масу.

Варіант із 50 % норми добрив забезпечив помітне підвищення врожайності порівняно з контролем. Рослини мали кращий ріст і розвиток завдяки додатковому мінеральному живленню, однак показники залишалися нижчими, ніж при повній нормі добрив.

Найкращі результати отримано у варіанті зі 100 % нормою нітроамофоски. Саме цей варіант забезпечив максимальну врожайність листового салату, шпинату та петрушки завдяки оптимальному забезпеченню рослин азотом, фосфором і калієм.

Таким чином, зі збільшенням концентрації добрив спостерігалася поступове зростання продуктивності всіх досліджуваних культур. Отримані результати підтверджують пряму залежність між концентрацією поживних речовин у живильному середовищі та врожайністю культур у гідропонних системах. Встановлено, що збалансоване мінеральне живлення сприяє інтенсивному росту

рослин, формуванню більшої біомаси та підвищенню ефективності гідропонного вирощування.

3.3. Економічна ефективність вирощування овочевих культур у гідропонних системах

Економічна оцінка вирощування овочевих культур у гідропонних системах є важливою складовою дослідження, оскільки дозволяє визначити доцільність використання сучасних технологій мінерального живлення та оцінити рівень рентабельності виробництва продукції. Аналіз економічної ефективності дає можливість оцінити співвідношення між витратами на вирощування культур та вартістю отриманого врожаю [18, 20].

У процесі дослідження було проведено економічний аналіз вирощування листового салату, шпинату та петрушки в умовах гідропонної системи залежно від складу живильного розчину. Основними показниками оцінки були виробничі витрати, врожайність культур, вартість отриманої продукції, собівартість та умовний прибуток.

Під час проведення розрахунків враховувалися витрати на насіннєвий матеріал, мінеральні добрива, електроенергію, воду, обслуговування гідропонної системи, оплату праці та допоміжні матеріали (табл. 3.4).

Таблиця 3.4

Витрати на вирощування овочевих культур у гідропонній системі (грн/м²)

Стаття витрат	Контроль	50 % норми добрив	100 % норми добрив
Насіння	35	35	35
Мінеральні добрива	0	18	35
Витрати води	12	12	12
Електроенергія	45	45	45
Обслуговування системи	28	28	28
Оплата праці	60	60	60
Допоміжні матеріали	15	15	15
Загальні витрати	195	213	230

Аналіз витрат показав, що найбільше збільшення виробничих витрат у варіантах із внесенням добрив було пов'язане з використанням мінерального живлення. Водночас підвищення витрат компенсувалося збільшенням врожайності та вартості отриманої продукції.

У контрольному варіанті без внесення добрив спостерігалися найнижчі показники продуктивності, що негативно вплинуло на економічну ефективність вирощування культур. Недостатній рівень мінерального живлення обмежував ріст рослин та формування зеленої маси.

Використання 50 % норми нітроамофоски забезпечило покращення росту культур та підвищення врожайності. У цьому варіанті додаткові витрати на добрива компенсувалися збільшенням маси отриманої продукції.

Найвищу економічну ефективність було отримано у варіанті зі 100 % нормою нітроамофоски. Саме цей варіант забезпечив найкращі фізико-хімічні параметри живильного розчину та максимальну продуктивність рослин.

Отримані результати свідчать про високу ефективність вирощування зеленних культур у гідропонних системах. Найбільшу вартість продукції забезпечив листовий салат завдяки найвищій урожайності (табл. 3.5). Високі економічні показники також були отримані при вирощуванні шпинату та петрушки.

Таблиця 3.5

Урожайність та вартість отриманої продукції

Культура	Урожайність, кг/м ²	Реалізаційна ціна, грн/кг	Вартість продукції, грн/м ²
Листовий салат	4,9	120	588
Шпинат	4,1	140	574
Петрушка	3,03	160	484,8

Для оцінки економічної ефективності було проведено розрахунок умовного прибутку шляхом віднімання загальних виробничих витрат від вартості отриманої продукції (табл. 3.6).

Таблиця 3.6

Розрахунок умовного прибутку

Культура	Вартість продукції, грн/м ²	Загальні витрати, грн/м ²	Умовний прибуток, грн/м ²
Листовий салат	588	230	358
Шпинат	574	230	344
Петрушка	484,8	230	254,8

Проведені розрахунки показали, що найбільший умовний прибуток був отриманий при вирощуванні листового салату, що пояснюється поєднанням високої врожайності та стабільного попиту на продукцію. Високі економічні показники також були характерні для шпинату та петрушки.

Отримані результати підтверджують, що застосування збалансованого мінерального живлення у гідропонних системах є економічно доцільним та сприяє підвищенню ефективності виробництва овочевої продукції.

Гідропонні технології дозволяють раціонально використовувати водні ресурси, зменшувати втрати поживних речовин та отримувати стабільні врожаї високої якості незалежно від ґрунтових умов. Це робить гідропоніку перспективним напрямом сучасного овочівництва, особливо в умовах обмежених земельних ресурсів та необхідності інтенсифікації виробництва.

Таким чином, результати економічної оцінки підтверджують доцільність використання гідропонних систем для вирощування зеленних культур та свідчать про перспективність впровадження даної технології у сучасне овочеве виробництво.

3.4. Рекомендації з оптимізації живильного середовища в гідропонних системах

За результатами проведених досліджень **для приватних домогосподарств** рекомендується застосування малогабаритних гідропонних систем із використанням збалансованого мінерального живлення для вирощування листового салату, шпинату та петрушки. Використання гідропонних технологій у домашніх умовах забезпечує можливість отримання стабільної овочевої продукції незалежно від сезонних факторів та ґрунтових умов.

Оптимальним для вирощування зеленних культур є використання живильного розчину з внесенням нітроамофоски у дозі 10 г на 10 л води, оскільки саме за таких умов були отримані найкращі показники росту, розвитку та врожайності рослин. Застосування зазначеної концентрації добрив забезпечує оптимальний баланс макроелементів у живильному середовищі та сприяє ефективному засвоєнню поживних речовин кореневою системою.

Для підтримання високої продуктивності культур рекомендується систематично контролювати фізико-хімічні параметри живильного розчину, зокрема рівень рН, електропровідність, загальну мінералізацію та концентрацію основних поживних елементів. Оптимальні значення рН повинні знаходитися в межах 6,0–6,5, а електропровідність – у межах 1500 - 2500 $\mu\text{S/cm}$.

Економічні розрахунки показали, що використання невеликих гідропонних систем є економічно доцільним навіть у приватному секторі. За середніх витрат на вирощування культур на рівні близько 147 грн/м² умовний прибуток від вирощування листового салату становив 358 грн/м², шпинату – 344 грн/м², а петрушки – 254,8 грн/м². Отримані результати свідчать про високу економічну ефективність застосування гідропонних технологій у домашньому овочівництві.

Для зниження експлуатаційних витрат рекомендується використання енергоощадних LED-систем освітлення, автоматичних таймерів подачі світла та систем рециркуляції води, що дозволяє підвищити ефективність використання енергетичних і водних ресурсів [22].

Для **промислового вирощування овочевих культур** доцільним є впровадження високотехнологічних автоматизованих гідропонних комплексів із системами безперервного контролю фізико-хімічних параметрів живильного середовища. Використання таких гідропонних технологій забезпечує інтенсифікацію виробництва, підвищення продуктивності культур та раціональне використання ресурсів [27].

На основі проведених досліджень рекомендовано використовувати живильний розчин із повною нормою нітроамофоски, що забезпечує оптимальний вміст азоту, фосфору та калію у водному середовищі. Саме цей варіант характеризувався найкращими показниками рН, електропровідності та концентрації макроелементів, що позитивно вплинуло на врожайність культур.

Для промислових підприємств особливо важливим є впровадження автоматизованих систем моніторингу рН, електропровідності, температури та вологості повітря, які дозволяють оперативно регулювати склад живильного середовища та підтримувати стабільні умови вирощування рослин [19, 25].

Економічний аналіз показав високу рентабельність використання гідропонних систем у промисловому овочівництві. За вирощування листового салату на площі 100 м² умовний прибуток становив 35,8 тис. грн, для шпинату – 34,4 тис. грн, а для петрушки – 25,48 тис. грн. Отримані результати підтверджують економічну доцільність застосування інтенсивних технологій мінерального живлення в умовах гідропонного виробництва.

Для підвищення ефективності виробництва рекомендується впровадження рециркуляційних систем водопостачання та автоматичного дозування добрив, що дозволяє зменшити втрати поживних речовин, оптимізувати використання водних ресурсів та знизити виробничі витрати [14, 23].

Особливу увагу необхідно приділяти лабораторному контролю якості води та живильного розчину, оскільки стабільність фізико-хімічних параметрів є одним із ключових факторів забезпечення високої врожайності та якості овочевої продукції.

Отримані результати досліджень підтверджують перспективність широкого впровадження гідропонних технологій у сучасному овочівництві.

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ

Під час проведення досліджень у гідропонних системах важливе значення має дотримання вимог охорони праці, виробничої санітарії, електробезпеки та пожежної безпеки. Використання електрообладнання, систем освітлення, насосів, лабораторних приладів і мінеральних добрив потребує створення безпечних умов праці та суворого виконання правил техніки безпеки. Організація безпечних умов праці є необхідною складовою ефективного функціонування гідропонних систем та забезпечення стабільного проведення експериментальних досліджень.

Основними небезпечними та шкідливими факторами під час роботи з гідропонними системами є підвищена вологість повітря, можливість ураження електричним струмом, контакт із мінеральними добривами, використання електричних приладів, слизькі поверхні через потрапляння води, а також тривала робота з лабораторним обладнанням. Особливу небезпеку становить поєднання вологи та електрообладнання, оскільки це може призвести до короткого замикання, пошкодження технічних засобів або ураження працівника електричним струмом [10, 19].

Для забезпечення безпечних умов праці всі електроприлади, що використовуються в системі гідропоніки, повинні бути технічно справними, мати надійну ізоляцію та заземлення. Забороняється використовувати обладнання з пошкодженими проводами, несправними вимикачами або відкритими контактами. Підключення насосів, ламп освітлення, компресорів та автоматизованих систем контролю повинно здійснюватися відповідно до вимог електробезпеки та технічної документації виробника.

Перед початком роботи необхідно перевіряти справність електрообладнання, наявність заземлення та цілісність кабелів живлення. Усі ремонтні роботи дозволяється виконувати лише після повного відключення

обладнання від електромережі. Працівникам забороняється торкатися електроприладів мокрими руками або працювати у вологому одязі та взутті.

Під час приготування живильних розчинів необхідно дотримуватися правил безпечної роботи з мінеральними добривами та хімічними речовинами. До складу нітроамофоски входять азотні, фосфорні та калійні сполуки, які при неправильному використанні можуть негативно впливати на організм людини. Працівники повинні використовувати засоби індивідуального захисту, зокрема захисні рукавички, лабораторний халат та захисні окуляри. При роботі з концентрованими добривами необхідно уникати потрапляння розчинів на шкіру, слизові оболонки та в органи дихання.

Приготування живильних розчинів рекомендується проводити у добре провітрюваному приміщенні або за наявності вентиляційної системи. Після завершення роботи необхідно ретельно мити руки з милом та очищати робоче місце від залишків добрив. Забороняється приймати їжу, зберігати харчові продукти або використовувати побутовий посуд у місцях роботи з хімічними речовинами.

У разі потрапляння живильного розчину або концентрованих добрив на шкіру чи в очі необхідно негайно промити уражене місце великою кількістю чистої води. Якщо подразнення не зникає, працівник повинен звернутися за медичною допомогою.

Приміщення для вирощування рослин у гідропонних системах повинно відповідати санітарно-гігієнічним вимогам. Необхідно забезпечити достатній рівень вентиляції, освітлення та підтримання оптимального температурного режиму. Вологість повітря не повинна перевищувати допустимі санітарні норми, оскільки надмірна вологість сприяє розвитку мікроорганізмів, утворенню конденсату та погіршенню умов праці.

Освітлення робочих приміщень повинно бути достатнім для безпечного виконання технологічних операцій і лабораторних вимірювань. Недостатній рівень освітлення може спричиняти підвищену втому працівників, зниження уважності та ризик виникнення травмонебезпечних ситуацій [28].

Для запобігання травматизму необхідно регулярно контролювати стан підлоги та не допускати накопичення води на робочих поверхнях. Підлога повинна бути рівною, неслизькою та легко очищуватись від забруднень. Робоче місце необхідно підтримувати у чистоті та порядку, а проходи між обладнанням повинні залишатися вільними.

Особливу увагу необхідно приділяти пожежній безпеці. У приміщенні повинні бути наявні первинні засоби пожежогасіння — вогнегасники, ящики з піском та засоби аварійного відключення електроживлення. Працівники повинні бути ознайомлені з правилами користування засобами пожежогасіння, схемою евакуації та порядком дій у разі виникнення пожежі чи аварійної ситуації.

Під час експлуатації гідропонних систем необхідно регулярно перевіряти технічний стан насосного обладнання, трубопроводів, резервуарів та систем циркуляції води. Своєчасне виявлення несправностей дозволяє запобігти витокам води, пошкодженню електрообладнання та аварійним ситуаціям.

Важливим елементом охорони праці є проведення інструктажів для працівників щодо правил безпечної експлуатації гідропонних систем, використання лабораторного обладнання та роботи з мінеральними добривами. Регулярне навчання персоналу сприяє підвищенню рівня безпеки праці та зниженню ризику виробничого травматизму.

Таким чином, дотримання вимог охорони праці забезпечує безпечне проведення досліджень, створення сприятливих умов праці, збереження здоров'я працівників та ефективну експлуатацію гідропонних систем під час вирощування овочевих культур.

ВИСНОВКИ

1. У результаті проведених досліджень встановлено, що фізико-хімічні параметри живильного розчину мають визначальний вплив на ріст, розвиток та продуктивність овочевих культур у гідропонних системах.
2. Доведено, що внесення комплексного мінерального добрива нітроамофоски спричиняє зміну основних показників якості живильного середовища, зокрема рН, загальної мінералізації, електропровідності, засоленості та концентрації макроелементів.
3. Встановлено, що зі збільшенням концентрації нітроамофоски спостерігалось підвищення загальної мінералізації живильного розчину від 410 до 1790 мг/дм³, що свідчить про зростання вмісту розчинених поживних речовин.
4. Визначено, що електропровідність живильного розчину збільшувалась від 690 до 2170 $\mu\text{S}/\text{cm}$ залежно від концентрації добрив, що забезпечувало покращення мінерального живлення рослин.
5. Установлено, що внесення мінеральних добрив сприяло зниженню рН живильного середовища до оптимальних значень 6,0–6,5, за яких забезпечується найбільш ефективно засвоєння поживних елементів кореневою системою рослин.
6. Доведено, що концентрація азоту, фосфатів та калію у живильному розчині прямо залежала від рівня внесення нітроамофоски та позитивно впливала на інтенсивність ростових процесів досліджуваних культур.
7. Встановлено пряму залежність між концентрацією поживних речовин у живильному середовищі та показниками продуктивності рослин у гідропонних системах.
8. Найвищі показники росту та врожайності були отримані у варіанті зі 100 % нормою нітроамофоски, який забезпечив оптимальні фізико-хімічні характеристики живильного розчину.

9. Визначено, що найбільш продуктивною культурою в умовах проведеного дослідження був листовий салат, урожайність якого становила 4,9 кг/м². Урожайність шпинату досягала 4,1 кг/м², а петрушки – 3,03 кг/м².

10. Дослідження підтвердило ефективність використання збалансованого мінерального живлення у гідропонних системах для підвищення врожайності та якості овочевої продукції.

11. Результати дослідження підтверджують і високу економічну ефективність вирощування зеленних культур у гідропонних системах. Найбільш прибутковою культурою в умовах проведеного дослідження виявився листовий салат, тоді як шпинат і петрушка також продемонстрували достатньо високі економічні показники. Умовний прибуток листового салату становив 358 грн/м², умовний прибуток шпинату – 344 грн/м², та петрушки – 254,8 грн/м².

12. Практичне значення роботи полягає у можливості використання отриманих результатів для оптимізації складу живильних розчинів, регулювання фізико-хімічних параметрів водного середовища та вдосконалення сучасних технологій гідропонного вирощування овочевих культур.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бондаренко Г. Л., Яковенко К. І. Овочівництво закритого ґрунту : навчальний посібник. Харків : Основа, 2019. 368 с.
2. Болотських О. С. Овочівництво : підручник. Харків : Основа, 2001. 512 с.
3. Жук В. М. Гідропонні системи та їх використання у тепличному господарстві. Науковий вісник НУБіП України. 2021. № 315. С. 87–94.
4. Василенко С. В. Гідропоніка як сучасний напрям овочівництва. *Аграрний вісник Причорномор'я*. 2021. № 98. С. 55–61.
5. Чайка В. О. Потенціал і розвиток вітчизняного тепличного господарства. Економіка АПК. 2016. URL: https://ir.kneu.edu.ua/items/61b6efa6-58fc-40be-a992-dc325a4a1a4c?utm_source=chatgpt.com (дата звернення: 05.05.2026).
6. Антипчук А. Ф., Роїк М. В. Гідропоніка та сучасні технології вирощування овочевих культур : навч. посіб. Київ : Аграрна освіта, 2018. 256 с.
7. Євтушенко М. Д., Маренич М. М. Інноваційні технології в овочівництві закритого ґрунту. Полтава : Астроя, 2022. 275 с.
8. Жученко А. А. Адаптивне рослинництво. Київ : Аграрна наука, 2010. 432 с.
9. Куц О. В., Тернавський А. Г. Субстратні технології вирощування овочів у теплицях. *Овочівництво і багтанництво*. 2022. Вип. 71. С. 45 - 53.
10. Кутовенко В. Б., Міхаліна І. Г., Гонтар В. Т. Сучасні технології вирощування овочевих культур : навч. посіб. Київ, 2014. 327 с. URL: <https://dglb.nubip.edu.ua/server/api/core/bitstreams/6b3ab6dc-0861-451c-80f3-76e3f1a7a5e6/content> (дата звернення: 05.05.2026).
11. Мельник О. О., Барабаш О. Ю. Тепличне овочівництво України: сучасний стан та перспективи розвитку. Київ : Аграрна наука, 2021. 304 с.
12. Турчин В. В. Контроль якості живильних розчинів у гідропонних системах. *Вісник аграрної науки*. 2023. № 4. С. 56–62.

13. Гончарук М. І. Сучасні системи краплинного живлення у тепличному господарстві. *Вісник аграрної науки*. 2022. № 7. С. 44–50.
14. Деркач О. П. Особливості вирощування томатів на мінеральній ваті в умовах гідропоніки. *Овочівництво і багданництво*. 2020. Вип. 68. С. 73–79.
15. Чернищенко В. І., Пашковський А. Х., Кирій П. І. Сучасні технології овочівництва відкритого ґрунту : підручник. Київ : Центр учбової літератури, 2017. 335 с. URL: https://dokumen.pub/9786175843157.html?utm_source=chatgpt.com (дата звернення: 05.05.2026).
16. Шаповал О. М. Сучасні тенденції розвитку гідропонних технологій у світі та в Україні. *Наукові горизонти*. 2022. № 11. С. 140–148.
17. Харченко В. В. Екологічні переваги гідропонного способу вирощування рослин. *Збалансоване природокористування*. 2021. № 3. С. 120–126.
18. Ткаченко Р. І. Управління мікрокліматом у теплицях із гідропонними системами. *Аграрний форум*. 2023. № 2. С. 92–99.
19. Семенюк І. М. Використання LED-освітлення у тепличному овочівництві. *Сучасне овочівництво*. 2022. № 4. С. 51–58.
20. Савчук Н. П. Технологічні аспекти вирощування зеленних культур методом гідропоніки. *Подільський вісник сільського господарства*. 2021. № 35. С. 76–82.
21. Adams P. Nutritional Control in Hydroponics. In : *Hydroponic Production of Vegetables and Ornamentals*. Embu : Casper Publications, 2015. P. 211–261.
22. Романенко В. О. Моніторинг якості води у гідропонних системах. *Екологічні науки*. 2023. № 1. С. 113–119.
23. Петренко Л. В. Сучасні субстрати для безґрунтового вирощування овочевих культур. *Вісник Сумського НАУ*. 2022. № 9. С. 84–90.
24. Велит І. А., Ляшенко С. В., Калініченко А. В. Енергоефективні джерела світла для вирощування томатів в умовах закритого ґрунту. Полтава : ТОВ НВП «Укрпромторгсервіс», 2017. С. 101–111. URL: https://dspace.pdau.edu.ua/entities/publication/f2b89d8e-e45f-4b35-a283-a5c6fba2c84e?utm_source=chatgpt.com (дата звернення: 05.05.2026).

25. Nichols M. A. Hydroponics and Protected Cultivation. *Chronica Horticulturae*. 2018. Vol. 57, № 3. P. 5–10.
26. Raviv M., Lieth J. H. Soiless Culture : Theory and Practice. 2nd ed. Amsterdam : Elsevier, 2019. 587 p.
27. Ковальчук І. І. Автоматизація контролю параметрів живильного розчину в гідропоніці. *Техніка і технології АПК*. 2022. № 3. С. 27–33.
28. Дудник С. О., Кравченко Л. М. Використання кокосового субстрату у гідропонних системах. *Наукові праці Інституту овочівництва і баштанництва НААН*. 2021. Т. 67. С. 118–124.
29. Садовська Н. П., Маргітай Л. Г., Симочко В. В., Попович Г. Б. Овочівництво закритого ґрунту : навч. посіб. Ужгород : Вид-во УжНУ «Говерла», 2011. 160 с. URL: <https://dspace.uzhnu.edu.ua/items/3c2426a9-8153-4d1b-9310-f879423c236b> (дата звернення: 05.05.2026).
30. Sharma N., Acharya S., Kumar K. Hydroponics as an Advanced Technique for Vegetable Production : An Overview. *Journal of Soil and Water Conservation*. 2018. Vol. 17, № 4. P. 364–371.
31. Про нормативи екологічно безпечного зрошення, осушення, управління поливами та водовідведенням : Постанова Кабінету Міністрів України від 02.09.2020 № 766. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/766-2020-%D0%BF?utm_source=chatgpt.com#Text (дата звернення: 05.05.2026).
32. ДСТУ EN 13652:2015. Меліоранти ґрунту та середовища росту. Екстрагування водорозчинних поживних речовин та елементів (EN 13652:2001, IDT). Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2015. 18 с. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=80559&utm_source=chatgpt.com (дата звернення: 05.05.2026).
33. ДСТУ 2730:2015. Якість природної води для зрошення. Агрономічні критерії. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 14 с.
34. ДСТУ 7174:2010. Вода для зрошення. Екологічні критерії якості. Київ : Держспоживстандарт України, 2011. 12 с.