

Національна академія наук України
Інститут технічної теплофізики

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Мирончук Анна Олегівна

УДК 536.423

ДИСЕРТАЦІЯ

ІНТЕНСИФІКАЦІЯ МАСООБМІНУ В ЖИВИЛЬНИХ СЕРЕДОВИЩАХ ШЛЯХОМ ГІДРОДИНАМІЧНОГО ОБРОБЛЕННЯ

144 – Теплоенергетика

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Анна МИРОНЧУК

Науковий керівник – Дубовкіна Ірина Олександрівна, доктор технічних наук,
старший науковий співробітник

Київ – 2025

АНОТАЦІЯ

Миرونчук А.О. Інтенсифікація масообміну в живильних середовищах шляхом гідродинамічного оброблення. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 144 – Теплоенергетика. – Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ, 2025.

Дисертаційна робота присвячена інтенсифікації масообмінних процесів у живильних середовищах гідропонних систем шляхом застосування гідродинамічного оброблення з використанням методу дискретно-імпульсного введення енергії (ДІВЕ).

Сьогодні у світі гостро стоїть питання підвищення ефективності сільськогосподарського виробництва за умов обмежених природних ресурсів та кліматичних змін. Одним із найперспективніших напрямів в аграрній сфері є гідропоніка, яка забезпечує стабільність урожайності, контрольованість живлення та можливість замкнених циклів виробництва. Однак якість та біологічна цінність живильних середовищ часто знижується через недостатню однорідність і стабільність традиційних методів підготовки.

У таких умовах актуальним завданням є створення сучасних енергоефективних технологій оброблення живильних розчинів, здатних забезпечити покращення їхніх фізико-хімічних параметрів, зменшити ризик утворення осадів і біоплівки, підвищити біодоступність елементів живлення для рослин.

Зміст дисертаційного дослідження викладено у п'яти розділах.

У *вступі* обґрунтовується актуальність обраної теми, формулюються мета та завдання дослідження, розкривається наукова новизна та практичне значення роботи, наведено інформацію про апробацію результатів і публікації автора.

У *першому розділі* здійснено ґрунтовний аналітичний огляд сучасного стану проблеми. Детально розглянуто існуючі методи вирощування рослин у закритому ґрунті та технологічні підходи до приготування живильних середовищ для гідропонних систем. Проведено аналіз наукових публікацій і практичного досвіду застосування різних способів фізико-хімічного та біологічного оброблення розчинів. Встановлено, що більшість відомих технологій характеризуються низкою обмежень: вони або потребують значних енергетичних витрат і мають недостатню продуктивність, або не забезпечують стабільності складу, стерильності та довготривалої однорідності живильних розчинів у промислових масштабах. Окремо акцентовано на проблемі утворення біоплівки та осадів, які негативно впливають на ефективність живлення рослин. У цьому контексті обґрунтовано доцільність застосування методу дискретно-імпульсного введення енергії (ДІВЕ) як перспективного підходу до підвищення ефективності та надійності оброблення живильних середовищ.

У *другому розділі* представлено матеріали та методи дослідження. Подано опис спеціально створеної експериментальної установки замкненого циркуляційного типу з роторно-пульсаційним апаратом, яка дозволяє відтворювати різні режими гідродинамічного впливу на живильні розчини. Детально охарактеризовано застосовані методики аналітичної хімії, зокрема потенціометрію для визначення рівня рН, оптичну мікроскопію для виявлення мікроагломератів і біоплівки, а також титриметричні методи для контролю складу середовищ. Використано модельні середовища, що відповідають вимогам чинних стандартів якості води та гідропонних розчинів. Проведено статистичну оцінку точності отриманих результатів, зокрема із застосуванням критерію Кохрена, яка підтвердила високу відтворюваність експериментів і достовірність отриманих даних. Це створило надійну базу для подальших досліджень та моделювання процесів гідродинамічного оброблення.

У *третьому розділі* виконано математичне моделювання процесів гідродинамічного оброблення. Сформульовано систему рівнянь Нав'є–Стокса

для вільних потоків у поєднанні з рівняннями Брінкмана–Дарсі–Форхаймера для пористих середовищ. Отримані чисельні результати дозволили кількісно оцінити вплив пористості, проникності та інтенсивності імпульсних навантажень на характер масообміну.

У *четвертому розділі* досліджено вплив гідродинамічного оброблення на компонентний склад і фізико-хімічні параметри гідропонних середовищ (рН, окисно-відновний потенціал, вміст розчиненого кисню). Встановлено підвищення біодоступності макро- та мікроелементів, зменшення накопичення небажаних органічних сполук та зростання стабільності систем. Результати експериментів співставлено з математичним моделюванням, що підтвердило їх високу кореляцію.

У *п'ятому розділі* розроблено промислові технології підготовки гідропонних середовищ і поливної води, сформульовано практичні рекомендації для виробничого впровадження та виконано техніко-економічне обґрунтування. Доведено, що використання гідродинамічного оброблення є технічно й фінансово доцільним для сучасних агропромислових комплексів.

У *загальних висновках* подано основні наукові та практичні результати дослідження. Зокрема, підтверджено ефективність методу ДІВЕ для стабілізації параметрів живильних розчинів, доведено можливість підвищення біологічної продуктивності культур на 20–30% у виробничих умовах та обґрунтовано промислове впровадження розроблених технологій.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

- 1) встановлено основні гідродинамічні фактори, а саме: швидкість зсуву потоку, напруження зсуву потоку, час оброблення, що впливають на зміну мікробіологічних показників гідропонних середовищ.
- 2) теоретично доведено та експериментально підтверджено, що під час гідродинамічного оброблення при напруженнях зсуву 185-190 Па досягається зниження чисельності мікроорганізмів у 2,5–3 рази.
- 3) теоретично доведено та експериментально підтверджено, що під час гідродинамічного оброблення при швидкостях зсуву потоку 3,55-

$3,8 \times 10^5 \text{с}^{-1}$ відбувається зміна фізико-хімічних параметрів гідропонних розчинів.

- 4) встановлено, що оброблення гідропонних розчинів із застосуванням методу дискретно-імпульсного введення енергії призводить до зниження розчиненого кисню на 60%, що впливає на зміну мікробіологічних показників.

Практичне значення отриманих результатів:

- розроблено енергоощадну технологію отримання живильних середовищ, яка дозволяє скоротити споживання енергії на 20% порівняно з традиційною;

- розроблена технологія дозволяє скоротити використання сировинних ресурсів на 55-65 % (за рахунок зменшення потреби у додаткових реагентах та економії води до 90 %);

- за результатами фітотестування встановлено підвищення продуктивності рослин на 20–30 % (для сільськогосподарських культур);

- дослідження були проведені у виробничих умовах, що підтверджено актами випробувань на підприємстві ТОВ АГРОСВІТ-ЖИТОМИР.

Ключові слова: *гідропоніка, живильне середовище, гідродинамічне оброблення, дискретно-імпульсне введення енергії, масообмін, енергоефективність.*

ANNOTATION

Myronchuk A.O. Intensification of Mass Transfer in Nutrient Media by Means of Hydrodynamic Treatment. – Qualifying scientific work on manuscript rights.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 144 – Heat Power Engineering. – Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2025.

The dissertation is devoted to the intensification of mass transfer processes in nutrient media of hydroponic systems through the application of hydrodynamic treatment using the method of discrete-pulse energy input (DPEI).

Today, the urgent issue worldwide is to increase the efficiency of agricultural production under conditions of limited natural resources and climate change. One of the most promising directions in the agricultural sector is hydroponics, which ensures yield stability, controlled plant nutrition, and the possibility of closed production cycles. However, the quality and biological value of nutrient solutions often decrease due to the insufficient homogeneity and stability of traditional preparation methods.

Under these circumstances, the creation of modern energy-efficient technologies for nutrient solution treatment is an urgent task. Such technologies should improve the physicochemical parameters of nutrient media, reduce the risk of sediment and biofilm formation, and increase the bioavailability of nutrients for plants.

The dissertation research is presented in five chapters.

The Introduction substantiates the relevance of the chosen topic, defines the aim and objectives of the study, reveals the scientific novelty and practical significance of the work, and provides information on the approbation of the results and the author's publications.

The first chapter provides a comprehensive analytical review of the current state of the problem. Existing methods of crop cultivation in closed soil conditions and technological approaches to the preparation of nutrient solutions for hydroponic

systems are examined in detail. An analysis of scientific publications and practical experience in applying various physicochemical and biological treatment methods is carried out. It is established that most known technologies are limited: they either require significant energy consumption and have insufficient productivity, or they fail to ensure stability, sterility, and long-term homogeneity of nutrient solutions on an industrial scale. Special attention is paid to the problem of biofilm and sediment formation, which negatively affect the efficiency of plant nutrition. In this context, the expediency of using the discrete-pulse energy input method (DPEI) as a promising approach to enhancing the efficiency and reliability of nutrient solution treatment is substantiated.

The second chapter presents the materials and methods of the study. A description is given of a specially designed closed-loop experimental setup with a rotor-pulsation apparatus, which allows the reproduction of different regimes of hydrodynamic influence on nutrient solutions. The applied methods of analytical chemistry are characterized in detail, including potentiometry for determining pH levels, optical microscopy for detecting microaggregates and biofilms, as well as titrimetric methods for monitoring the composition of solutions. Model nutrient media were used that comply with current standards for water quality and hydroponic solutions. Statistical evaluation of the accuracy of the obtained results was performed, including the application of Cochran's criterion, which confirmed the high reproducibility of the experiments and the reliability of the data. This provided a solid foundation for further research and modeling of hydrodynamic treatment processes.

In the third chapter, mathematical modeling of hydrodynamic treatment processes was performed. A system of Navier–Stokes equations for free flows was formulated in combination with the Brinkman–Darcy–Forchheimer equations for porous media. The obtained numerical results made it possible to quantitatively evaluate the influence of porosity, permeability, and the intensity of pulse loads on the character of mass transfer.

In the fourth chapter, the effect of hydrodynamic treatment on the component composition and physicochemical parameters of hydroponic nutrient media (pH, redox potential, dissolved oxygen content) was investigated. It was found that such treatment increases the bioavailability of macro- and microelements, reduces the accumulation of undesirable organic compounds, and enhances the stability of the systems. The experimental results were compared with mathematical modeling, which confirmed a high degree of correlation.

In the fifth chapter, industrial technologies for the preparation of hydroponic nutrient media and irrigation water were developed, practical recommendations for industrial implementation were formulated, and a techno-economic assessment was carried out. It was proven that the use of hydrodynamic treatment is both technically and financially feasible for modern agro-industrial complexes.

The general conclusions summarize the main scientific and practical results of the research. In particular, the effectiveness of the DPEI method for stabilizing the parameters of nutrient solutions was confirmed, the possibility of increasing the biological productivity of crops by 20–30% under production conditions was demonstrated, and the industrial implementation of the developed technologies was substantiated.

The scientific novelty of the results obtained lies in the following:

1. The main hydrodynamic factors have been identified, namely: flow shear rate, flow shear stress, and treatment time, which influence the changes in microbiological indicators of hydroponic media.
2. It has been theoretically proven and experimentally confirmed that during hydrodynamic treatment at shear stresses of 185–190 Pa, the number of microorganisms decreases by a factor of 2.5–3.
3. It has been theoretically proven and experimentally confirmed that during hydrodynamic treatment at flow shear rates of $3.55\text{--}3.8 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$, changes in the physicochemical parameters of hydroponic solutions occur.

4. It has been established that the treatment of hydroponic solutions using the method of discrete-impulse energy input leads to a 60% reduction of dissolved oxygen, which affects the changes in microbiological indicators.

Practical significance of the obtained results:

- An energy-saving technology for the preparation of nutrient media has been developed, which allows reducing energy consumption by 20% compared to traditional methods.
- The developed technology ensures a reduction in the use of raw materials by 55–65% (due to decreased demand for additional reagents) and water savings of up to 90%.
- According to phytotesting results, an increase in crop productivity by 20–30% (for agricultural plants) has been established.
- The research was carried out under industrial conditions, which is confirmed by testing acts at the enterprise LLC “AGROsvit-Zhytomyr”.

Keywords: *hydroponics, nutrient medium, hydrodynamic treatment, discrete-pulse energy input, mass transfer, energy efficiency.*

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Dubovkina, I., Myronchuk, A. (2024). Alternating Impulses of Pressure for New Technologies in food production. *Ukrainian Journal of Food Science*, Issue 12(1), p. 67-80. DOI:10.24263/2310-1008-2024-12-1-8 [Фахове видання, *Google Scholar*] (Внесок здобувача: виконання теоретичних досліджень, участь у написанні статті, підготовка аналітичних матеріалів).
2. Dubovkina, I., Myronchuk, A. (2024). Application of the alternating impulses of pressure for new energy-saving technologies. *Systems, decision and control in energy VI* (Studies in Systems, Decision and Control, Vol. 552, pp. 599–611). Cham: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-67091-6_28 [Міжнародне видання, *SpringerLink*, *Scopus*, *Web of Science*] (Внесок здобувача: розробка методики досліджень, моделювання процесів, аналіз результатів).
3. Дубовкіна, І. О., Мирончук, А. О. (2025). Застосування знакозмінних імпульсів тиску для інтенсифікації гідропонного вирощування рослин. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*, 36(75), 3, 147–152. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.3.1/19> [Фахове видання, *Google Scholar*, *Index Copernicus*] (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, статистична обробка даних, формування висновків).
4. Дубовкіна, І. О., Мирончук, А. О. (2025). Використання методу дискретно-імпульсного введення енергії для підвищення продуктивності у гідропонних технологіях. *Інтегровані технології та енергозбереження*, (3), 3–13. <https://doi.org/10.20998/2078-5364.2025.3.01> [Фахове видання, *Ulrich's Periodicals Directory*] (Внесок

здобувача: проведення експериментальних досліджень, статистична обробка даних, формування висновків).

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

5. Dubovkina, I., Myronchuk, A. (2021). Hydrodynamic processing of solutions in technologies of obtaining nutrient media. *Proceedings of the III International Conference “European Dimensions of Sustainable Development”*, June 11, 2021, Kyiv, Ukraine. Kyiv: NUFT, 2021. P. 48. ISBN 978-966-612-263-9. (Внесок здобувача: підготовка матеріалів доповіді).
6. Дубовкіна І.О., Мирончук А.О. (2021). Використання новітніх методів в технологіях вирощування гідропонним способом. *Інноваційні технології в АПК: збірник тез доповідей VIII всеукраїнської науково-практичної конференції*, 20–21 травня 2021 р., Луцьк. Луцьк: Луцький НТУ, 2021. С. 160–161. (Внесок здобувача: формулювання наукової проблеми, участь у написанні та редагуванні тез).
7. Дубовкіна І.О., Мирончук А.О. (2021). Перспективи розвитку територій у контексті впровадження сучасних енергоефективних технологій. *Матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених «Перспективи розвитку територій: теорія і практика»*, 18–19 листопада 2021 р., Харків. Харків: ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2021. (Внесок здобувача: авторська розробка теми та виклад основних результатів).
8. Дубовкіна І.О., Мирончук А.О. (2021). Керовані енергетичні впливи в технологіях одержання живильних середовищ. *Теоретичні і прикладні проблеми фізики, математики та інформатики: матеріали XIX Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених*, 13–14 травня 2021 р., Київ. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. Том I. С. 82–84. ISBN 978-966-986-622-2. (Внесок

- здобувача: підготовка матеріалів, аналіз сучасних методів оброблення, формування висновків).
9. Дубовкіна І.О., Мирончук А.О. (2021). Використання керованих енергетичних впливів в технологіях одержання живильних середовищ. *Матеріали VI Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції студентів, аспірантів і молодих вчених «Актуальні проблеми сучасної енергетики»*, 19–21 травня 2021 р., Херсон. Херсон: ПП «Резнік», 2021. С. 177–180. (Внесок здобувача: участь у написанні тексту, обґрунтування наукових положень).
 10. Dubovkina I., Makarevych A., Myronchuk A. (2022). Hydrodynamic treatment of hydroponic solutions. *Student in Bucovina: Abstracts of International Conference for Students*, 10 November, Stefan cel Mare University of Suceava, Romania. P. 29. (Внесок здобувача: підготовка частини матеріалів та обґрунтування результатів).
 11. Дубовкіна І.О., Мирончук А.О. (2022). Інноваційні технології енергетичного впливу на живильні середовища. *Наукові проблеми харчових технологій та промислової біотехнології в контексті Євроінтеграції: програма та тези матеріалів XI Міжнародної науково-технічної конференції*, 8 листопада 2022 р., Київ. Київ: НУХТ, 2022. С. 29–30. (Внесок здобувача: аналіз новітніх методів, підготовка тез).
 12. Dubovkina I., Myronchuk A. (2022). Energy saving technology of hydrodynamic treatment of nutrient solutions. *Матеріали IV Науково-практичної конференції «Безпека енергетики в епоху цифрової трансформації»*, 24 листопада 2022 р., Київ: ІПМЕ ім. Пухова НАН України, 2022. С. 6–8. (Внесок здобувача: розробка концепції та виклад основних положень).
 13. Dubovkina I., Myronchuk A. (2023). Original uninterrupted mode of water treatment for growing crops. *Матеріали 89 Міжнародної наукової конференції молодих учених, аспірантів і студентів «Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті»*, 3–7

- квітня 2023 р. Київ: НУХТ, 2023. Ч. 2. С. 14. *(Внесок здобувача: підготовка матеріалів, формулювання висновків).*
14. Дубовкіна І.О., Мирончук А.О. (2024). Енергоощадна технологія підготовки живильних середовищ із застосуванням гідродинамічних ефектів. *Актуальні проблеми та перспективи розвитку фундаментальних, прикладних, загально-технічних та безпекових наук: Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції, 27 червня 2024 р., Київ.* Київ: УДУ ім. М. Драгоманова, 2024. С. 39–42. *(Внесок здобувача: формування теми, написання тез, підготовка висновків).*
15. Dubovkina I., Myronchuk A. (2024). Uninterrupted energy and resource saving mode of water treatment for growing crops. *Матеріали VIII Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції студентів, аспірантів і молодих вчених «Актуальні проблеми сучасної енергетики», 23 травня 2024 р., Хмельницький.* Херсон: ФОП Вишемирський В.С., 2024. С. 148–149. *(Внесок здобувача: підготовка основної частини тез, участь у формуванні висновків).*
16. Дубовкіна І., Мирончук А. (2025). Застосування знакозмінних імпульсів тиску в нових технологіях харчових виробництв. *Матеріали 91-ї Міжнародної наукової конференції молодих учених, аспірантів і студентів «Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у ХХІ столітті», 7–11 квітня 2025 р. Київ: НУХТ, 2025. Ч. 2. С. 17.* *(Внесок здобувача: підготовка основної частини тез, участь у формуванні висновків).*

ЗМІСТ

| | |
|--|----|
| ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ..... | 17 |
| ВСТУП..... | 18 |
| РОЗДІЛ 1 ГІДРОДИНАМІЧНЕ ОБРОБЛЕННЯ ЖИВИЛЬНИХ СЕРЕДОВИЩ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ МЕТОДУ ДИСКРЕТНО-ІМПУЛЬСНОГО ВВЕДЕННЯ ЕНЕРГІЇ..... | 22 |
| 1.1 Особливості вирощування в умовах закритого ґрунту..... | 22 |
| 1.2 Способи вирощування в умовах закритого ґрунту..... | 27 |
| 1.3 Основні методи гідропонного вирощування..... | 36 |
| 1.4 Використання живильних середовищ..... | 41 |
| 1.5 Основні способи та методи оброблення живильних середовищ..... | 47 |
| 1.6 Застосування методу дискретно-імпульсного введення енергії для оброблення живильних середовищ..... | 57 |
| 1.7 Вибір напрямку дослідження..... | 61 |
| Висновки за розділом..... | 63 |
| РОЗДІЛ 2 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРОДИНАМІЧНОГО ОБРОБЛЕННЯ ГІДРОПОННИХ ЖИВИЛЬНИХ СЕРЕДОВИЩ..... | 65 |
| 2.1 Опис експериментальної установки..... | 65 |
| 2.2 Опис методик проведення експериментального дослідження..... | 69 |
| 2.3 Методи експериментальних досліджень..... | 71 |
| 2.3.1 Методи аналітичної хімії (потенціометрія)..... | 71 |
| 2.3.2 Методи мікроскопії..... | 73 |
| 2.3.3 Хімічні методи..... | 76 |
| 2.4 Модельні середовища..... | 79 |
| 2.5 Основне вимірювальне обладнання та прилади..... | 80 |
| 2.6 Обрахунок похибки вимірювання..... | 85 |
| Висновки за розділом..... | 86 |

| | |
|--|-----|
| РОЗДІЛ 3 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ГІДРОДИНАМІЧНОГО ОБРОБЛЕННЯ ГІДРОПОННИХ ЖИВИЛЬНИХ СЕРЕДОВИЩ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ МЕТОДУ ДИСКРЕТНО-ІМПУЛЬСНОГО ВВЕДЕННЯ ЕНЕРГІЇ..... | 88 |
| 3.1 Обґрунтування вибору математичної моделі гідродинамічного оброблення..... | 88 |
| 3.2 Математичне моделювання процесу гідродинамічного оброблення..... | 89 |
| 3.3 Результати математичного моделювання..... | 97 |
| Висновки за розділом..... | 102 |
| РОЗДІЛ 4 ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ГІДРОДИНАМІЧНОГО ОБРОБЛЕННЯ НА ГІДРОПОННІ ЖИВИЛЬНІ СЕРЕДОВИЩА..... | 104 |
| 4.1 Дослідження впливу гідродинамічного оброблення на компонентний склад гідропонних живильних середовищ..... | 104 |
| 4.2 Дослідження впливу гідродинамічного оброблення на фізико-хімічні параметри живильних середовищ..... | 124 |
| 4.2.1 Дослідження впливу гідродинамічного оброблення на водневий показник гідропонних живильних середовищ..... | 124 |
| 4.2.2 Дослідження впливу гідродинамічного оброблення на окисно-відновний потенціал гідропонних живильних середовищ.... | 130 |
| 4.2.3 Дослідження впливу гідродинамічного оброблення на вміст розчиненого кисню в гідропонних живильних середовищах..... | 135 |
| 4.3 Співставлення результатів математичного моделювання та експериментальних даних..... | 139 |
| Висновки за розділом..... | 141 |
| РОЗДІЛ 5 РОЗРОБЛЕННЯ ПРОМИСЛОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ І РЕКОМЕНДАЦІЙ ЩОДО ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ..... | 143 |

| | |
|---|-----|
| 5.1 Розроблення технології одержання гідропонного живильного середовища..... | 143 |
| 5.2 Розроблення технології одержання поливальної води..... | 151 |
| 5.3 Рекомендації щодо впровадження технологій у промислове виробництво..... | 156 |
| 5.4 Техніко-економічне обґрунтування впровадження розроблених технологій..... | 160 |
| Висновки за розділом..... | 169 |
| ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ..... | 171 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ..... | 173 |
| ДОДАТОК А..... | 185 |
| ДОДАТОК Б..... | 189 |

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

pH – показник кислотно-лужного балансу розчину;

$ОВП$ – окисно-відновний потенціал (мВ);

$РРК$ – розчинений кисень (мг/л);

Δ – зміна величини відносно початкового значення;

Re – число Рейнольдса, критерій режиму течії;

μ – динамічна в'язкість рідини (Па·с);

ρ – густина рідини (кг/м³);

τ – напруження зсуву (Па);

$\dot{\gamma}$ – швидкість зсуву (с⁻¹);

v – швидкість потоку (м/с);

p – тиск у потоці (Па);

k – коефіцієнт проникності середовища (м²);

t – час (с);

$ДІВЕ$ – дискретно-імпульсне введення енергії;

$РПА$ – роторно-пульсаційний апарат;

$ГДО$ – гідродинамічне оброблення;

ε – пористість середовища;

Da – число Дарсі, безрозмірний критерій проникності;

Re_k – число Рейнольдса проникності пористого середовища;

β – коефіцієнт нелінійного опору Форхаймера;

A – амплітуда імпульсу дискретно-імпульсного введення енергії;

T – період імпульсу (с);

c – концентрація розчиненої речовини (мг/л);

k_{La} – коефіцієнт масоперенесення (1/с);

OV – об'ємна витрата потоку (л/хв або м³/с).

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. Сучасне агропромислове виробництво стикається з потребою впровадження високоефективних, енергоощадних і екологічно безпечних технологій вирощування сільськогосподарських культур. В умовах глобального зростання населення, дефіциту природних ресурсів і кліматичних змін особливої актуальності набуває розвиток методів інтенсивного землеробства, зокрема безґрунтових способів вирощування рослин. Одним із найбільш перспективних напрямів у цій сфері є гідропоніка, що забезпечує керованість живлення, стабільність урожайності та можливість організації замкнених виробничих циклів.

У гідропонних системах саме живильне середовище відіграє ключову роль, адже воно є єдиним джерелом елементів мінерального живлення для рослин. Його якість, стабільність і біологічна доступність визначають не лише темпи росту, але й загальний фітосанітарний стан рослин, їхню стійкість до стресових факторів і біологічну продуктивність. Проте традиційні методи підготовки живильного розчину часто не забезпечують належної однорідності, стерильності та стабільності, особливо у промислових масштабах.

У цьому контексті виникає потреба в пошуку нових технічних рішень для вдосконалення технології приготування та оброблення живильних розчинів. Одним із таких рішень є використання гідродинамічного оброблення із застосуванням методу дискретно-імпульсного введення енергії який, завдяки поєднанню гідродинамічної кавітації, турбулентного зсуву та імпульсної мікрофільтрації, дозволяє досягти глибокої гомогенізації середовищ без додаткового використання хімічних стабілізаторів. Застосування даного технологічного рішення дає змогу істотно підвищити ефективність живильного середовища за рахунок покращення фізико-хімічних властивостей розчину, стерилізації, зменшення енерговитрат і втрат поживних компонентів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційне дослідження виконано в межах науково-дослідної тематики Інституту технічної теплофізики Національної академії наук України, відповідно до плану наукових досліджень та тем, а саме «Синергетичний ефект імпульсного впливу в гідродинамічних і тепломасообмінних процесах технологій диспергування та гомогенізації» (0120U103391, 2020-2024).

Мета і завдання дослідження. Мета роботи – інтенсифікація масообміну в живильних середовищах, шляхом гідродинамічного оброблення із застосуванням методу дискретно-імпульсного введення енергії.

Для досягнення мети було поставлено такі завдання:

1. Провести комплексні аналітичні дослідження способів одержання живильних середовищ, а саме гідропонних розчинів.
2. Розробити методику, розрахувати та створити експериментальний стенд для дослідження впливу режимів дискретно-імпульсного введення енергії на оброблення живильних середовищ, а саме гідропонних розчинів.
3. Визначити закономірності масообміну, у живильних середовищах при застосуванні методу ДІВЕ.
4. Встановити вплив гідродинамічного оброблення на фізико-хімічні параметри живильних середовищ, а саме гідропонних розчинів.
5. Розробити практичні рекомендації з використання отриманих результатів в технологіях одержання живильних середовищ.
6. Розробити енергоенергоощадну технологію одержання живильних середовищ із застосуванням методу дискретно-імпульсного введення енергії.

Об'єкт і предмет дослідження. Об'єктом дослідження є процес гідродинамічного оброблення живильних середовищ у гідропонних системах.

Предметом дослідження є зміна фізико-хімічних та біологічних характеристик живильних середовищ.

Моделльні середовища. Дистильована вода, технологічна вода, живильні середовища гідропонних розчинів, які відповідають ірригаційним умовам ДСТУ 2730:2015, ДСТУ 7591:2014.

Методи дослідження. Для досягнення поставленої мети в дисертаційній роботі використано комплекс взаємопов'язаних теоретичних і експериментальних методів дослідження, що дозволяють всебічно охарактеризувати процес обробки живильних середовищ у гідропонних системах.

У частині фізико-хімічного аналізу використовувались методи аналітичної хімії, зокрема потенціометрія – для визначення рівня рН середовищ до та після обробки, а також оптична мікроскопія – для оцінки та візуального виявлення мікроагломератів і біоплівки у розчинах.

Моделювання гідродинамічних процесів здійснювалося на основі рівнянь Нав'є-Стокса та рівняння нерозривності. Математичне моделювання дозволило оптимізувати геометричні та режимні параметри обладнання.

3-D моделювання використано для визначення падіння тиску та падіння швидкості під час проходження живильного розчину через інертний носій в гідропонній системі.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій, які захищаються: достовірність отриманих наукових положень та висновків сформульованих в дисертації обґрунтовано методами та збігом теоретичних і експериментальних результатів досліджень.

Наукова новизна одержаних результатів:

- 1) встановлено основні гідродинамічні фактори, а саме: швидкість зсуву потоку, напруження зсуву потоку, час оброблення, що впливають на зміну мікробіологічних показників гідропонних середовищ.
- 2) теоретично доведено та експериментально підтверджено, що під час гідродинамічного оброблення при напруженнях зсуву 185-190 Па досягається зниження чисельності мікроорганізмів у 2,5–3 рази.
- 3) теоретично доведено та експериментально підтверджено, що під час гідродинамічного оброблення при швидкостях зсуву потоку 3,55- $3,8 \times 10^5 \text{c}^{-1}$ відбувається зміна фізико-хімічних параметрів гідропонних розчинів.

4) встановлено, що оброблення гідропонних розчинів із застосуванням методу дискретно-імпульсного введення енергії призводить до зниження розчиненого кисню на 60%, що впливає на зміну мікробіологічних показників.

Практичне значення отриманих результатів.

- розроблено енергоощадну технологію отримання живильних середовищ, яка дозволяє скоротити споживання енергії на 20% порівняно з традиційною;

- розроблена технологія дозволяє скоротити використання сировинних ресурсів на 55-65 % (за рахунок зменшення потреби у додаткових реагентах та економії води до 90 %);

- за результатами фітотестування встановлено підвищення продуктивності рослин на 20–30 % (для сільськогосподарських культур);

- дослідження були проведені у виробничих умовах, що підтверджено актами випробувань на підприємстві ТОВ АГРОСВІТ-ЖИТОМИР.

Особистий внесок здобувача. Здобувачем здійснено огляд та аналіз наукової літератури, виконано основну частину експериментальних досліджень, проведено обробку й інтерпретацію отриманих даних. Автор брав участь у постановці загальної наукової задачі, узагальненні експериментальних результатів, а також у підготовці наукових доповідей та публікацій.

Апробація результатів дослідження. Основні результати дисертаційної роботи обговорювались та отримали схвалення на таких наукових форумах: XIX Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Теоретичні і прикладні проблеми фізики, математики та інформатики» (Київ, 2021), VIII Всеукраїнська науково-практична конференція «Інноваційні технології в АПК» (Луцьк, 2021), VI Всеукраїнська науково-практична інтернет-конференція «Актуальні проблеми сучасної енергетики» (Херсон, 2021), V Міжнародна науково-практична конференція «Перспективи розвитку територій: теорія і практика» (Харків,

2021), III Міжнародна науково-практична конференція «Європейські виміри сталого розвитку» (Київ, 2021), XI Міжнародна науково-технічна конференція «Наукові проблеми харчових технологій та промислової біотехнології в контексті Євроінтеграції» (Київ, 2022), IV Науково-практична конференція «Безпека енергетики в епоху цифрової трансформації» (Київ, 2022), International Conference for Students «Student in Bucovina» (Suceava, Romania, 2022), 89 Міжнародна наукова конференція молодих учених, аспірантів і студентів «Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті» (Київ, 2023), Всеукраїнська науково-практична конференція «Актуальні проблеми та перспективи розвитку фундаментальних, прикладних, загально-технічних та безпекових наук» (Київ, 2024), VIII Всеукраїнська науково-практична інтернет-конференція «Актуальні проблеми сучасної енергетики» (Хмельницький, 2024).

Публікації. Основні положення дисертації були представлені на міжнародних і всеукраїнських наукових конференціях, а також опубліковані у фахових виданнях, що входять до переліку МОН України. За результатами дослідження опубліковано 4 наукові праці, з яких 3 статті у фахових виданнях, включаючи 1 статтю у виданнях, індексованих у наукометричних базах Scopus/Web of Science.

Структура дисертації. Дисертація викладена на 193 сторінках друкованого тексту, складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. У роботі наведено 30 рисунків, 18 таблиць, 22 формули, що ілюструють результати теоретичних і експериментальних досліджень. Список використаних джерел включає 100 найменувань, зокрема праці українських та зарубіжних авторів, наукові статті, нормативні документи й методичні матеріали.

РОЗДІЛ 1

ГІДРОДИНАМІЧНЕ ОБРОБЛЕННЯ ЖИВИЛЬНИХ СЕРЕДОВИЩ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ МЕТОДУ ДИСКРЕТНО-ІМПУЛЬСНОГО ВВЕДЕННЯ ЕНЕРГІЇ

1.1 Особливості вирощування в умовах закритого ґрунту

Актуальність широкого впровадження систем закритого типу зростає на фоні глобальних викликів – насамперед урбанізації, втрати родючих сільськогосподарських земель через ерозію, засолення чи хімічне забруднення, а також кліматичних змін, що призводять до підвищення температури, дефіциту води та поширення фітопатогенів. У таких умовах системи закритого ґрунту стають не лише технологічним рішенням, а й стратегічною відповіддю на потребу у забезпеченні продовольчої безпеки та сталого сільського господарства у XXI столітті.

Особливої уваги заслуговує інтеграція інноваційних безґрунтових технологій, зокрема гідропоніки, аеропоніки та аквапоніки, які у поєднанні з вертикальними фермами дозволяють досягати надвисокої щільності посіву, зменшення витрат води на 70–90 % у порівнянні з традиційним землеробством, а також значно покращують контроль над масо- та теплопереносом у зоні кореневого живлення. За даними досліджень, у таких умовах продуктивність рослин підвищується на 20–50 % завдяки підтриманню стабільного редокс-потенціалу, достатньої концентрації розчиненого кисню (DO) та оптимальних показників електропровідності живильного розчину (EC) [1].

Контрольовані агросистеми також створюють унікальне середовище для цільового моделювання фізико-хімічних властивостей живильного розчину: можлива зміна рН, температури, іонного складу, інтенсивності турбулізації рідини, що відкриває шлях до застосування гідродинамічних технологій. Таким чином, закриті системи вирощування не лише забезпечують ефективну

культивувацію рослин, але й є ідеальним середовищем для дослідження механізмів біофізичної взаємодії між рослиною і живильним середовищем.

Закритий ґрунт, який охоплює теплиці, фітокамери та інші типи контрольованого середовища, забезпечує можливість повного або часткового керування ключовими абіотичними факторами – температурою, світловим режимом, відносною вологістю повітря, концентрацією CO₂, а також іонним складом живильного розчину. Саме регульованість цих параметрів дозволяє створити фізіологічно оптимальні умови для рослинного росту, прискорити онтогенетичні етапи розвитку культури, інтенсифікувати фотосинтетичну продуктивність і підвищити ефективність поглинання макро- й мікроелементів. Крім того, ці системи дозволяють точно моделювати тепловий режим та покращити масообмін у зоні кореневого живлення шляхом застосування технологій аерації, гідродинамічної турбулізації та нанобульбування [2].

Проте варто зазначити, що рослини, вирощені в умовах закритого ґрунту, демонструють суттєві морфофізіологічні відмінності порівняно з аналогами у відкритому полі. Згідно з узагальненими даними метааналізів [3], лабораторно вирощені культури мають підвищений рівень питомої площі листка, що свідчить про тонші листкові пластинки з менш розвиненим мезофілом і нижчою механічною стабільністю. Такі рослини також характеризуються вищою концентрацією нітрогену в листковій масі, підвищеною відносною швидкістю росту, але нижчою загальною біомасою на момент фінального збору через коротшу тривалість експозиції до повноцінного освітлення та відсутність польових стрес-факторів [4, с. 355].

Додатковим фактором, що відрізняє закриті системи, є мінімізація конкуренції між рослинами завдяки рівномірному просторовому розміщенню саджанців у індивідуальних модулях або горщиках, що знижує варіативність між особинами, дозволяючи проводити високоточні фенотипові вимірювання. Саме дана особливість сприяє стандартизації досліджень і дає змогу глибше

оцінювати вплив генотипу, обробок або середовищних параметрів на рослину [5, с. 211].

Разом з тим, актуальною залишається проблема екстраполяції лабораторних результатів на польові умови, оскільки фототермічне співвідношення (співвідношення щоденної кількості світла до температури) в камерах значно відрізняється від природного середовища, що впливає на баланс джерел і споживачів асимілятів у рослині та може зумовлювати суттєві зсуви в її фізіологічному статусі [6].

Особливу увагу в системах контрольованого вирощування рослин слід приділяти створенню стабільного та фізіологічно активного середовища для кореневої системи, адже саме воно є ключовим регулятором не лише водно-мінерального живлення, а й масо- та теплопереносу у прикореневій зоні. В умовах гідропоніки, аеропоніки чи субстратного вирощування середовище, що оточує корінь, перестає бути інертним, перетворюючись на динамічну біо-фізико-хімічну систему. Основними параметрами, що визначають ефективність її функціонування, є рН, окисно-відновний потенціал (ОВП або ORP), рівень розчиненого кисню (DO), температурний режим та видовий і функціональний склад мікробіоти.

Зміна хоча б одного з цих показників здатна зрушити рівновагу системи, активізувати або пригнічувати мікробні консорціуми, змінити доступність іонів елементів живлення, а також модулювати метаболізм корневих клітин. Так, наприклад, зниження рівня DO нижче 5,0 мг/л у живильному розчині значно зменшує поглинання нітратів і фосфатів та сприяє розмноженню анаеробних патогенів, зокрема *Pythium spp.* і *Fusarium spp.* [7].

ОВП відіграє роль «редокс-регулятора», впливаючи на активність ферментів кореневої системи та на формування біоплівки. Оптимальні значення ОВП у гідропоніці коливаються в межах 120-150 мВ – саме в цьому діапазоні підтримується стабільна мікрофлора, пригнічується анаеробна біота й активується синтез рослинних метаболітів [8, с. 297].

Ще одним фактором є температура живильного середовища, яка впливає на в'язкість, здатність до масопереносу та біологічну активність кореневої зони. Дослідження показують, що підвищення температури живильного розчину понад 26-28 °C викликає стрес для рослин, призводить до зниження вмісту DO та підвищення ризику колонізації патогенами [9].

Мікробний склад також є визначальним для росту та розвитку рослин, оскільки біоактивні види (наприклад, *Trichoderma*, *Bacillus*, *Pseudomonas*) продукують ферменти та метаболіти, що впливають на адсорбцію іонів, pH, а також утворюють мікробні біоплівки, які здатні змінювати гідродинаміку середовища. У цьому контексті гідروпоніка набуває рис біоінженерної системи, де теплофізичні параметри – не просто фізичні змінні, а наслідок складної взаємодії біо-, хемо- та терморегуляторних механізмів [10].

Таким чином, керування параметрами кореневої зони в умовах закритого ґрунту набуває статусу ключової технології, яка одночасно вирішує завдання підвищення урожайності, зниження захворюваності та стабілізації теплофізичних процесів у системах високоефективного землеробства.

Оскільки умови закритого ґрунту – зокрема в теплицях, фітотронних камерах та вертикальних фермах – не забезпечують повної відповідності природним абіотичним стресорам, таким як добові коливання температури, дія вітру, фотоперіодичні зміни чи ґрунтове мікрооточення, результати експериментів у контрольованому середовищі не завжди безпосередньо відображають реальну продуктивність рослин у відкритому ґрунті. Багато досліджень демонструють, що морфофізіологічні ознаки рослин, вирощених у лабораторних умовах, значно відрізняються від польових аналогів – наприклад, мають вищу питому площу листка (SLA), нижчу механічну щільність тканин і менш розвинену кореневу систему, але демонструють швидші темпи росту за рахунок відсутності конкуренції та стресу [11, с. 839].

Такі обмеження у відтворенні реального середовища зумовлюють необхідність розробки нових адаптивних підходів, які дозволять підвищити достовірність лабораторних досліджень і забезпечити релевантність їх

результатів для практичних аграрних технологій. У цьому контексті дедалі більшої ваги набувають технології цифрового моделювання та біоінженерії, зокрема побудова математичних моделей тепломасообміну, що враховують фізико-хімічні параметри середовища, тип живильного розчину, активність мікрофлори та морфогенез рослин.

Поряд із цим, інтеграція автоматизованих сенсорних систем моніторингу (контроль температури, рН, ЕС, DO, світлового спектра та ін.) дозволяє створювати адаптивні режими вирощування, які враховують не лише загальні потреби культури, а й динаміку її розвитку в реальному часі. Такі системи, зокрема на базі IoT та штучного інтелекту, вже успішно застосовуються у США, Нідерландах, Японії та Ізраїлі у високотехнологічному рослинництві [12].

Формування гібридного підходу, який поєднує математичне моделювання, біофізичну оптимізацію середовища та алгоритмічне керування параметрами гідропонної системи, стає необхідною умовою для створення адаптивних систем вирощування, орієнтованих на максимальну ефективність засвоєння елементів живлення та резистентність рослин до біотичних і абіотичних чинників.

Дослідження систем вирощування в умовах закритого ґрунту виявило комплекс специфічних характеристик, що критично впливають на ефективність росту рослин, їх морфофізіологічний розвиток і метаболічну активність. Незважаючи на переваги контрольованого середовища – стабільність параметрів, відсутність абіотичних стресів, мінімізовану міжрослинну конкуренцію – встановлено, що такі умови можуть призводити до спотворення природного онтогенезу культур. Особливої уваги заслуговує штучне середовище кореневої зони, яке в умовах гідропоніки формується не лише як фізична матриця для фіксації, а як складна динамічна система, де відбуваються тепломасообмінні процеси, активується мікробіота та забезпечується іонний транспорт. Аналіз наукових джерел і сучасних технологій вказує на доцільність розробки комплексних адаптивних систем,

що базуються на математичному моделюванні параметрів середовища, використанні інструментів автоматизованого моніторингу та застосуванні біоінженерних стратегій.

1.2 Способи вирощування в умовах закритого ґрунту

Умови закритого ґрунту, або захищеного ґрунту, охоплюють різноманітні технології вирощування сільськогосподарських культур у середовищах із контрольованими абіотичними факторами. Дані методи дозволяють значно підвищити врожайність, керованість агротехнічного процесу, а також знизити вплив негативних чинників зовнішнього середовища. У цьому контексті існує кілька основних способів вирощування в умовах закритого ґрунту, що представлено на рис. 1.1.



Рис. 1.1. Основні способи вирощування в умовах закритого ґрунту

Джерело: розроблено автором на основі [13]

Один із базових типів гідропонної технології – це система глибоководної культури, або DWC (deep water culture). У таких установках рослини розміщують у спеціальних кошиках над водною поверхнею, а їхня коренева система занурена безпосередньо в розчин, який аерується компресорами. Кисень, розчинений у воді, надходить безпосередньо до коренів, що підтримує інтенсивність дихальних процесів. Завдяки цьому забезпечується стабільне постачання поживних речовин та газообмін без необхідності додаткового субстрату.

Окремо варто згадати систему крапельного живлення, яка широко застосовується як у промислових теплицях, так і в індивідуальному рослинництві. У ній живильний розчин подається до кожної рослини за допомогою крапельних емітерів із заданою періодичністю. Такий спосіб дозволяє точно дозувати кількість розчину відповідно до потреб кожної культури та знижує ризик перезволоження. Разом із цим, він є менш чутливим до збоїв, ніж інші системи [14].

Серед очевидних переваг гідропонних технологій – можливість цілодобового моніторингу фізико-хімічних параметрів середовища, гнучкість у налаштуванні режимів живлення, підвищений контроль над температурою та складом розчину, а також відсутність бур'янів та значна економія водних ресурсів. З точки зору дослідження тепломасообміну, гідропоніка відкриває унікальні можливості для аналізу впливу змін у динаміці розчиненого кисню, аерації, температури середовища на інтенсивність дихання кореневої системи та засвоєння елементів.

Водночас ці системи не позбавлені недоліків. Однією з головних проблем є енергозалежність: навіть короткочасне відключення електропостачання може призвести до порушення аерації розчину і втрати урожаю. Крім того, висока вологість і температура створюють сприятливе середовище для розвитку патогенних мікроорганізмів, що зумовлює необхідність постійного мікробіологічного моніторингу розчину та впровадження систем біозахисту або введення антагоністичних

мікроорганізмів. Таким чином, гідропоніка як форма вирощування в умовах закритого ґрунту є надзвичайно перспективною для інтенсифікації агропроцесів, однак вимагає високої технологічної дисципліни і адаптивного менеджменту [15, с. 925].

Субстратне вирощування є проміжною формою між традиційним ґрунтовим землеробством і безсубстратними системами. У цьому методі замість природного ґрунту використовуються інертні або органічні матеріали, які не беруть активної участі в живленні рослин, проте виконують важливі функції у підтриманні фізико-хімічного балансу навколо кореневої системи. Типовими прикладами таких субстратів є мінеральна вата, кокосовий торф, перліт, вермикуліт або їхні комбінації. Такі матеріали характеризуються високою пористістю, стабільністю структури та здатністю до утримання вологи, що дозволяє створити сприятливе середовище для розвитку коренів.

Живлення рослин у субстратних системах забезпечується через зрошення живильним розчином, який містить усі необхідні макро- та мікроелементи. Живлення здійснюється переважно через крапельне зрошення або мікрокрапельні системи з точно дозованим внесенням. Тобто, поживні речовини доставляються безпосередньо в зону коренів, а субстрат виконує роль буфера, який утримує вологу і мінерали на деякий час, що дозволяє уникнути швидкого виснаження середовища навіть у разі тимчасових збоїв у подачі.

Однією з ключових переваг субстратного вирощування є його адаптивність – підбір субстрату може здійснюватися відповідно до фізіологічних потреб конкретної культури. Наприклад, для культур із високою потребою в аерації, таких як томати, перевага надається перліту або кокосовому волокну, тоді як для декоративних рослин часто використовують мінеральну вату, яка забезпечує рівномірний розподіл вологи [16].

Субстрат також відіграє важливу роль у стабілізації температури навколо коренів, що є особливо актуальним у закритих агросистемах, де навіть незначні коливання температури можуть впливати на інтенсивність

тепломасообміну. Зокрема, в умовах високої вологості він допомагає уникнути перегріву кореневої зони завдяки здатності акумулювати тепло і поступово його віддавати. Крім того, субстрати можуть впливати на рН і ОВП розчину завдяки своєму хімічному складу, що потребує ретельного моніторингу та налаштування режимів живлення.

Попри значні переваги, субстратне вирощування має свої обмеження. До них належить необхідність регулярної заміни або стерилізації субстрату, особливо в разі його повторного використання, щоб уникнути накопичення патогенів. Також у таких системах складніше досягнути абсолютної стерильності, тому контроль мікробного складу залишається важливим завданням. Водночас, буферна здатність субстрату може знижувати ризики, пов'язані зі швидкими змінами концентрації мінералів або вмісту кисню, що робить цю технологію зручнішою для стабільного комерційного виробництва.

Субстратне вирощування поєднує в собі переваги гідропонних систем і елементів ґрунтового середовища, забезпечуючи стабільність водного та живильного режимів, а також пом'якшуючи негативний вплив стресових чинників. З огляду на це, описана технологія посідає важливе місце в системах закритого ґрунту, особливо в тих випадках, коли необхідно поєднати високий контроль за умовами росту з елементами фізичної підтримки та біобуферизації середовища.

Аeropоніка являє собою найпрогресивніший та найтехнологічніший метод безсубстратного вирощування рослин, в якому живильне середовище подається безпосередньо до відкритої кореневої системи у вигляді аерозольної суміші. На відміну від гідропоніки та субстратних технологій, де корені занурені у рідину або контактують із твердим середовищем, в aeroponіці коренева система знаходиться у повітрі, в спеціальних герметичних камерах або туманних тунелях, що забезпечує прямий доступ до кисню. Поживні речовини у формі дрібнодисперсного туману подаються через високоточні форсунки або ультразвукові генератори з певною періодичністю [17].

Однією з головних переваг аеропоніки є екстремально високий рівень насичення кореневої системи киснем. Завдяки повному доступу повітря до кореневої зони, активується аеробне дихання, підвищується інтенсивність метаболізму та покращується засвоєння макро- і мікроелементів. Всі фактори прямо впливають на швидкість росту рослин, щільність кореневої маси та ефективність транспіраційних процесів. У результаті забезпечується максимальна продуктивність при мінімальномu використанні води й добрив, що особливо важливо в умовах обмежених ресурсів.

Інтенсивність тепломасопереносу в аеропонних системах суттєво перевищує аналогічні показники в класичних гідропонних чи субстратних системах. Причиною є те, що дрібнодисперсна форма розчину має більшу площу контакту, а тонкий шар туману швидко адаптується до змін температури й складу. Таке середовище створює ефективні умови для регуляції температури кореневої зони та розчиненого кисню, що критично важливо для інтенсивного росту, особливо в системах вертикального землеробства або в умовах штучного клімату [18].

Однак разом із перевагами аеропоніка вимагає надзвичайної точності в налаштуванні системи. Основними параметрами, які необхідно постійно контролювати, є вологість повітря, розмір крапель, тиск у системі подачі розчину, температура та частота циклів зрошення. Найменші збої – наприклад, зниження вологості або засмічення форсунок – можуть викликати стрес у рослин або навіть загибель через швидке пересихання коренів. Крім того, унаслідок високої вологості і наявності поживних речовин у відкритому середовищі зростає ризик розвитку патогенної мікрофлори, що вимагає особливої уваги до стерильності та регулярної дезінфекції компонентів системи.

Слід зазначити, що попри складність технічного обслуговування, аеропоніка вважається одним з найбільш перспективних методів для космічного землеробства та використання у замкнених системах життєзабезпечення. Експерименти NASA свідчать про ефективність

аеропоніки у середовищах із обмеженим простором і водними ресурсами, що підкреслює її потенціал у майбутніх агросистемах.

Таким чином, аеропоніка не тільки забезпечує високий рівень керованості процесами живлення, але й демонструє найбільший потенціал у сфері інноваційного рослинництва, особливо у поєднанні з автоматизованими системами контролю параметрів середовища та біосенсорними технологіями.

Вертикальні ферми являють собою інноваційні системи агровиробництва, в яких рослини вирощуються у багаторівневих конструкціях в умовах повного контролю параметрів середовища. У таких системах, на відміну від традиційного землеробства, простір використовується не лише в горизонтальній площині, а й у вертикальній, що дозволяє суттєво підвищити щільність розміщення рослин та ефективність використання обмежених площ, особливо в умовах урбанізованих територій.

У вертикальних фермах застосовуються сучасні агротехнології, серед яких домінують гідропоніка, аеропоніка або їхні гібридні форми. Завдяки відсутності ґрунту та використанню замкнених контурів циркуляції живильного розчину забезпечується високий ступінь керованості процесами живлення, а також зменшується споживання води й мінеральних добрив. Визначальним фактором ефективності є застосування штучного освітлення, переважно LED-світильників, які дозволяють точно регулювати спектральний склад та інтенсивність світла відповідно до фаз росту рослини, що сприяє оптимізації фотосинтетичної активності та підвищенню енергетичної ефективності системи [19].

Системи клімат-контролю у вертикальних фермах підтримують постійні температурні умови, відносну вологість, концентрацію CO₂ та швидкість повітрообміну. Таким чином, забезпечується стабільне мікросередовище для вегетації незалежно від сезону або погодних коливань. Ізоляція від зовнішнього середовища також значно знижує ризик зараження рослин патогенами, грибами чи шкідниками, а відтак дозволяє мінімізувати використання хімічних засобів захисту, що особливо важливо для

виробництва екологічно чистої продукції, орієнтованої на споживача в умовах міста.

Автоматизація у вертикальних фермах охоплює полив, живлення, моніторинг параметрів середовища, керування освітленням і навіть збір врожаю. Сучасні програмно-керовані системи дають змогу відстежувати в реальному часі фізіологічний стан рослин, регулювати умови на основі зворотного зв'язку та здійснювати прогнозування росту. Такі технології значно підвищують продуктивність та рентабельність виробництва.

Разом з тим вертикальні ферми вимагають високих початкових інвестицій, складного технічного обслуговування і стабільного енергозабезпечення, що може обмежувати їхнє широке впровадження. Водночас, за умов інтенсифікації тепломасообмінних процесів, оптимального керування світлом, газовим складом повітря і живильними середовищами, такі системи здатні забезпечити сталий, високоякісний і повторюваний врожай у будь-якій кліматичній зоні [20, с. 260].

Кліматичні камери та фітотрони є високоточними інженерними системами, призначеними для моделювання та відтворення заданих умов навколишнього середовища. Вони широко використовуються у фундаментальних та прикладних наукових дослідженнях, а також на початкових етапах вирощування рослин, наприклад, для пророщування насіння або вирощування розсади в умовах контрольованих факторів.

Особливістю таких установок є можливість програмного управління ключовими абіотичними параметрами – інтенсивністю, спектром і фотоперіодом освітлення; температурним режимом у денний і нічний час; відносною вологістю повітря; рівнем вуглекислого газу; швидкістю руху повітря; а в деяких моделях – навіть концентрацією озону чи летких органічних сполук. Завдяки цьому можна створювати точні кліматичні сценарії: імітувати умови тропічного лісу, арктичної тундри або посушливих степів – і таким чином вивчати адаптаційні реакції рослин до екстремальних або мінливих умов [21, с. 245].

Кліматичні камери дозволяють встановлювати повторювані параметри середовища, що особливо важливо для відтворюваності експериментів у фізіології, молекулярній біології, агрономії та біоінженерії рослин. Це дає змогу точно фіксувати ефекти впливу окремих змінних, зокрема температурного стресу, нестачі води, надлишку CO₂ чи дефіциту освітлення. Фітотрони, які є більш складними варіантами кліматичних камер, часто містять декілька незалежних відділень, що дозволяє одночасно проводити порівняльні дослідження за різних умов.

Кліматичні камери також дають змогу відстежувати зміну параметрів розчину, таких як температура, розчинність кисню (DO), окисно-відновний потенціал (ОВП), а також моделювати вплив мікробіологічної активності на фізико-хімічний стан середовища. Створюються умови для верифікації математичних моделей обмінних процесів, дослідження ефектів мікроаерації, впливу нанобульб, або застосування різних режимів оброблення живильного розчину [22].

Незважаючи на обмежену площу культивування, кліматичні камери забезпечують максимально точний контроль, який недоступний у польових умовах, що дає змогу проводити експерименти високої точності, включно з дослідженнями, спрямованими на оптимізацію умов росту для конкретних генотипів або сортів, селекційні дослідження, аналіз ефективності нових біостимуляторів чи агротехнічних прийомів [23, с. 579].

Кліматичні камери та фітотрони є невід'ємною складовою сучасної агробіотехнології, що дозволяє не лише отримувати глибші знання про реакції рослин на середовище, а й формувати наукові основи для подальшої інтенсифікації контрольованого землеробства – включно з гідропонікою, аеропонікою та вертикальними системами.

Контейнерне та модульне вирощування рослин становить новий етап розвитку високотехнологічного агровиробництва, який поєднує мобільність, автономність і повний контроль агрофізичних умов. Основу таких систем становлять ізольовані блоки – як правило, переобладнані морські контейнери

або спеціально розроблені модулі, всередині яких створено закрите середовище для вирощування культур на основі гідропоніки, аеропоніки чи їхніх комбінацій.

Установки оснащені комплексами штучного освітлення (переважно LED-технології з можливістю регулювання спектру), системами контролю температури, вологості, концентрації CO₂, кисню та параметрів живильного розчину, зокрема рН, ЕС та ОВП. Завдяки використанню енергоефективного обладнання, зокрема теплових насосів і сонячних панелей, контейнерні ферми здатні функціонувати автономно в умовах обмеженого або нестабільного енергопостачання [24, с. 50].

Окрему роль у таких системах відіграють технології дистанційного керування – сенсорні мережі, IoT-рішення, автоматизовані системи моніторингу, які передають дані у хмарні сховища для аналітики в реальному часі. Це дозволяє аграріям не лише своєчасно виявляти відхилення від оптимальних умов, а й прогнозувати потенційні ризики, як-от теплові стреси, мікробні спалахи чи дисбаланс елементів живлення, впливаючи на параметри середовища з високою точністю.

Контейнерні ферми знаходять застосування в регіонах з екстремальними кліматичними умовами, деградованими або радіаційно забрудненими ґрунтами, на ізольованих територіях (наприклад, арктичні станції, пустельні райони, військові бази), а також у міських умовах – як частина стратегій продовольчої безпеки. Їх мобільність дозволяє швидко реагувати на гуманітарні або екологічні виклики, забезпечуючи локальне виробництво свіжої продукції незалежно від зовнішніх факторів [25].

Вибір способу вирощування в умовах закритого ґрунту визначається цілями виробництва, наявними ресурсами, технічним забезпеченням і біологічними особливостями культур.

1.3 Основні методи гідропонного вирощування

Основні методи гідропонного вирощування поділяються на кілька технологічних систем, що відрізняються способом подачі живильного розчину до кореневої системи та ступенем її занурення. Кожен із методів має свої переваги й обмеження, і вибір оптимального залежить від виду рослини, вимог до врожайності, умов середовища, технічного забезпечення та цілей вирощування – комерційних, дослідницьких чи освітніх.

Існує кілька видів гідропонних систем, які поділяються на дві основні категорії: «пасивні» та «активні». У «пасивних» системах живильний розчин не зазнає механічного впливу і доставляється до коренів завдяки капілярним силам. Такі системи отримали назву гнотових.

«Активні» системи вимагають постійної циркуляції розчину, яка забезпечується насосами. Більшість із них також потребують додаткової системи аерації для насичення розчину киснем. Незважаючи на велику кількість модифікацій гідропонних систем, усі вони є варіаціями або комбінаціями шести базових типів.

Гнотова система (рис. 1.2) – живильний розчин подається в субстрат до рослини з резервуару за допомогою гноту. Така система використовується і при декоративному рослинництві зі звичайною землею (один кінець гноту поміщають в воду або спеціальний розчин, а інший - в горщик із землею).

Найбільший недолік цієї системи – те, що великі й вологолюбні рослини потребують більшої кількості живильного розчину, але не можуть його отримати в повній мірі. Такі рослини можуть відчувати серйозні проблеми з харчуванням і навіть загинути [26].

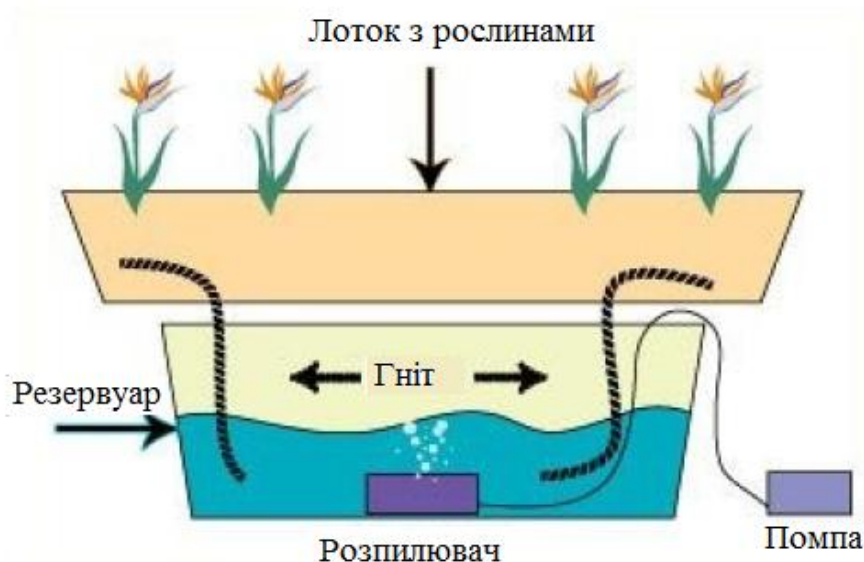


Рис. 1.2. Гнотова система гідропоніки

Джерело: [26].

Система глибоководних культур (метод «плаваючої платформи») (рис. 1.3) – рослини фіксуються на платформі (зазвичай з пінопласту), яка плаває на поверхні живильного розчину, розміщеного в контейнері. Коріння рослин перебуває в зануреному стані. Для забезпечення коренів киснем, здійснюють аерацію живильного розчину за допомогою повітряного насоса або ж виконують регулярну зміну розчину [27].

Водна культура – це альтернативний спосіб вирощування салатів та швидкозростаючих вологолюбних рослин. Не багато рослин добре ростуть в такому типі систем.

Система глибоководних культур добре підходить для отримання початкових навичок гідропоніки. Найбільший недолік систем цього типу – це те, що вони не підходять для великих і багаторічних рослин.

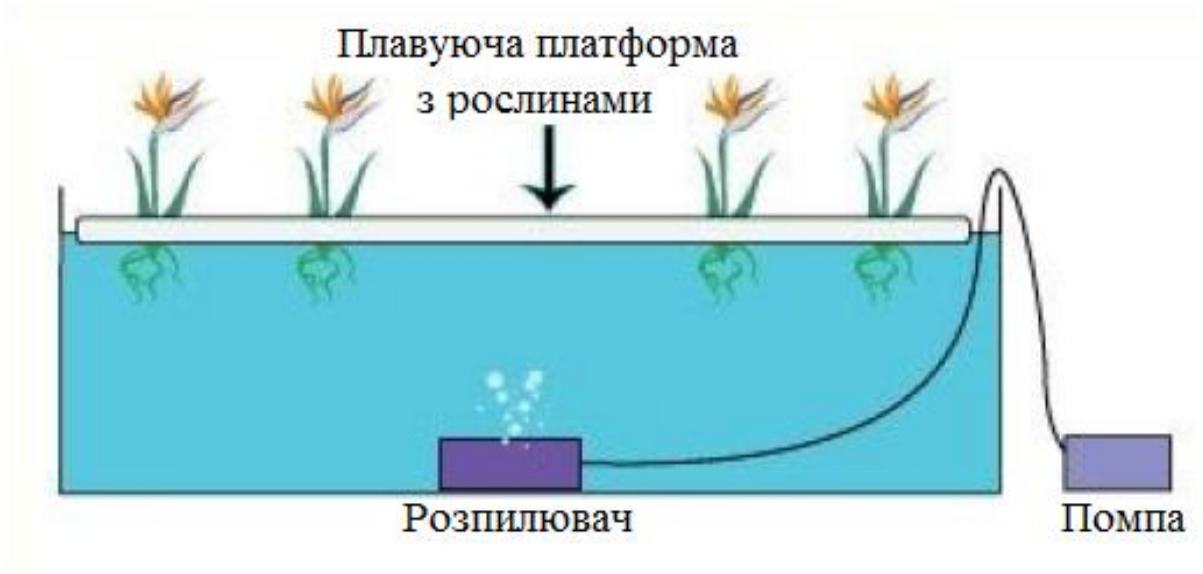


Рис. 1.3. Система глибоководних культур гідропоніки

Джерело:[27]

Система періодичного затоплення – процес автоматизований: насос з'єднаний з таймером. При включенні таймера, насос подає живильний розчин в лоток з корінням. При виключенні таймера живильний розчин самостійно зливається в резервуар (рис. 1.4).

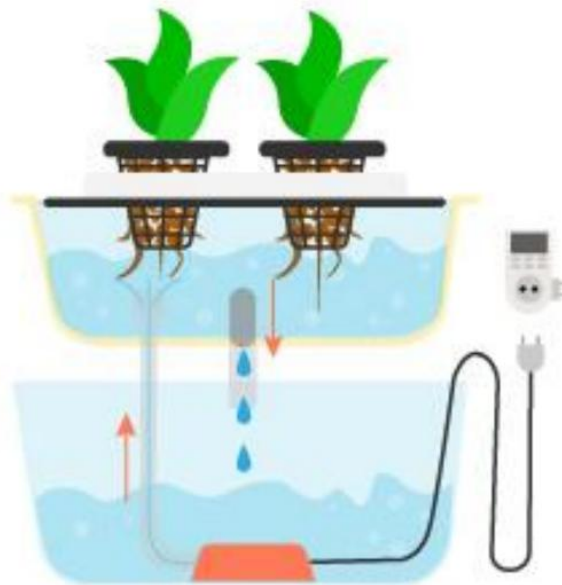


Рис. 1.4. Система періодичного затоплення

Джерело:[27]

Після зливання живильного розчину в резервуар відбувається аерація коренів. Процедура затоплення здійснюється кілька разів на день і залежить від виду вирощуваної культури, типу і властивостей субстрату. Недолік – вразливість в разі відключення електрики і поломки насоса або таймера.

Техніка живильного шару (NFT) (рис. 1.5). У контейнер, на якому фіксують рослини (рослини саджають в пластикові стаканчики з прорізами для вільного росту коренів), за допомогою насоса подають живильний розчин з резервуара. Розчин протікає по корінню рослин, а потім стікає назад в резервуар. Потік живильного розчину постійний, або включається автоматично через короткі проміжки часу. Головним недоліком даної системи є сприйнятливості до відключень електроенергії і поломок насоса.

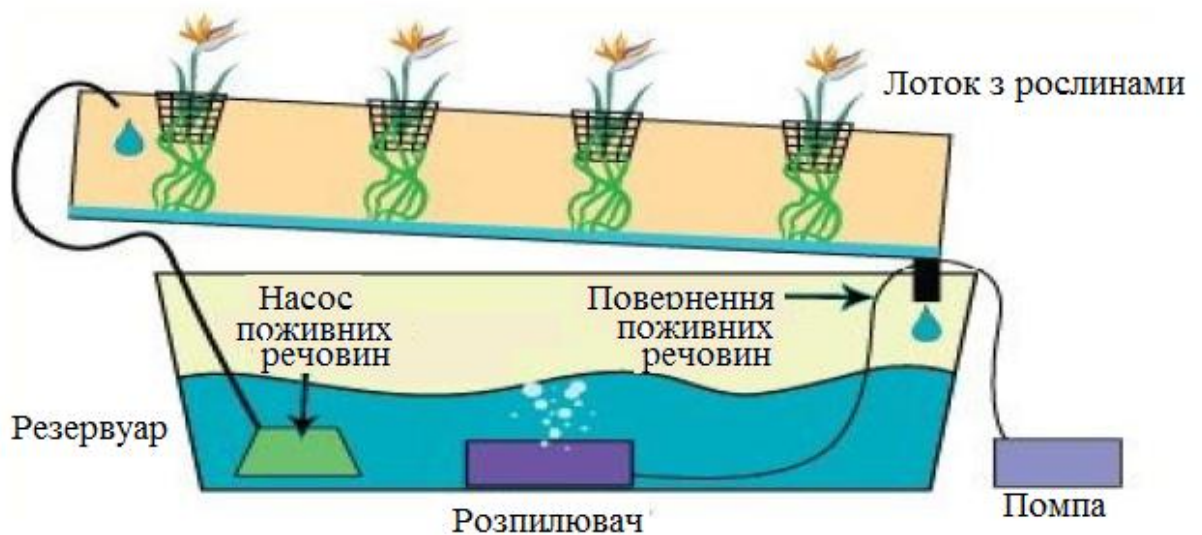


Рис. 1.5. Техніка живильного шару (NFT)

Джерело: [26].

Система крапельного поливу (рис. 1.6). Керований таймером насос подає живильний розчин, який за допомогою трубочок капає під підставку кожної рослини, коріння яких знаходяться в субстраті. Можливе використання окремих горщиків, що полегшує перестановку рослин, додавання і вилучення їх із системи.

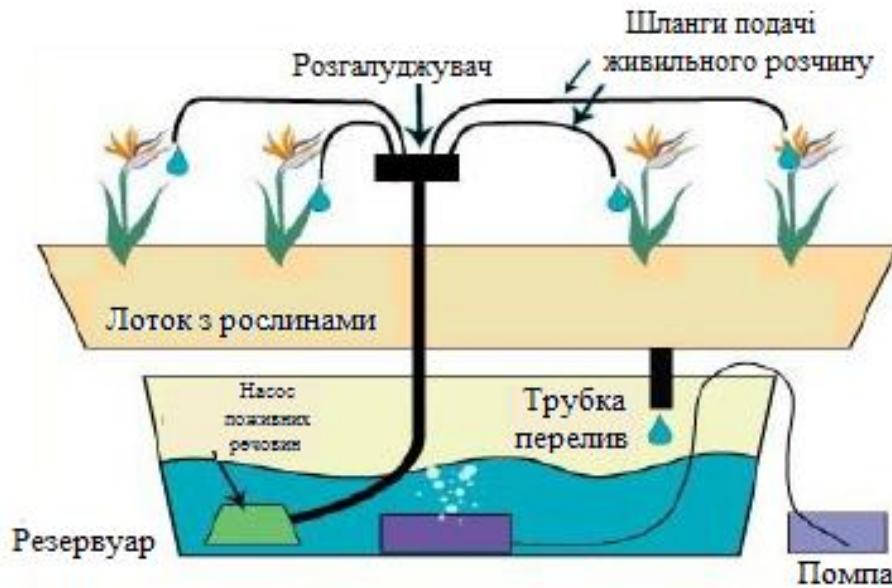


Рис. 1.6. Система крапельного поливу

Джерело: [26]

Головний недолік цієї системи полягає в тому, що при використанні деяких наповнювачів (гравій, керамзит, перліт) система стає чутливою до відключення електроенергії і неполадок насоса або таймера. Можуть засмічуватись шланги подачі розчину. Коріння може швидко висихати, якщо перервати циклічність водопостачання. Дану проблему можна частково вирішити при використанні наповнювачів, які всмоктують воду (керамзит, вермикуліт, кокосове волокно або спеціальні суміші).

Аeropоніка (рис. 1.7) – сама високотехнологічна з гідропонних систем. Рослини, що знаходяться в підвішеному стані з вільно звисаючими коріннями, кріпляться на кришці ємності, всередині якої знаходяться розпилювачі, що приходять в дію за допомогою таймера і насоса. У певний інтервал часу (визначаються виходячи з часу поглинання і випаровування живильного розчину) розпилювачі зрошують коріння живильним розчином у вигляді дрібних крапель. Таким чином, коріння рослин знаходяться в постійному тумані, що складається з живильної суміші і кисню. Висока аерація сприяє високим темпам зростання вирощуваних культур. У aeropоніці дуже важлива надвисока точність налаштування таймера, яка забезпечувала б короткий цикл

і включала насос на кілька секунд кожні кілька хвилин. Недолік системи – висихання коренів при відключенні електрики або ж поломки таймера або насоса.

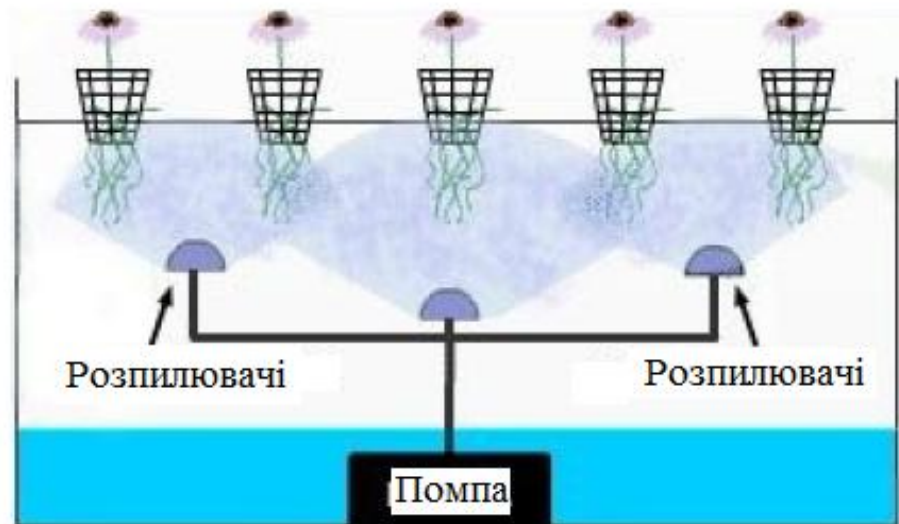


Рис. 1.7. Аеропоніка

Джерело: [26]

Гідропоніка поступово набирає обертів у агропромислового комплексу. Підвищується попит, збільшується масовість ринку, здешевлюється виробництво установок і знижується собівартість даних установок. З'являються нові проекти гідропонних установок, що дозволяють обробляти культури більш раціонально, економлячи площу, знижуючи трудовитрати на виготовлення установок, тим самим збільшуючи готову продукцію з найменшими витратами.

Вибір технології не лише визначає агрономічну ефективність, але й створює базу для вивчення фізико-хімічних параметрів середовища в умовах контрольованого землеробства.

1.4 Використання живильних середовищ

Живильне середовище у гідропоніці виконує функцію основного джерела макро- і мікроелементів, необхідних для повноцінного росту й

розвитку рослин. На відміну від традиційного ґрунтового вирощування, де поживні речовини частково фіксуються у твердій фазі, у безґрунтових системах вони знаходяться у водному розчині в доступній для засвоєння формі, що обумовлює високу чутливість гідропонного виробництва до параметрів і стабільності розчину.

В сучасних умовах агропромисловий комплекс стикається із необхідністю зменшення енергетичних витрат у виробництві рослинної продукції, що обумовлює потребу в інноваційних технологіях, що сприяють підвищенню врожайності та скороченню тривалості вирощування. Зокрема, важливим напрямком є підвищення засвоюваності макро- і мікроелементів рослинами через зміну властивостей живильних середовищ.

Живильне середовище (рис. 1.8) – рідкий, напіврідкий або щільний субстрат, який використовується для вирощування мікроорганізмів, в тому числі бактерій, в лабораторних і виробничих умовах.

При культивуванні мікроорганізмів важливо створити оптимальні умови для їх росту. Одним з основних факторів успішного культивування є склад і властивості живильного середовища. Універсального живильного середовища, придатного для зростання і розвитку всіх без винятку мікроорганізмів не існує, оскільки конструктивні і енергетичні процеси мікробів різні.

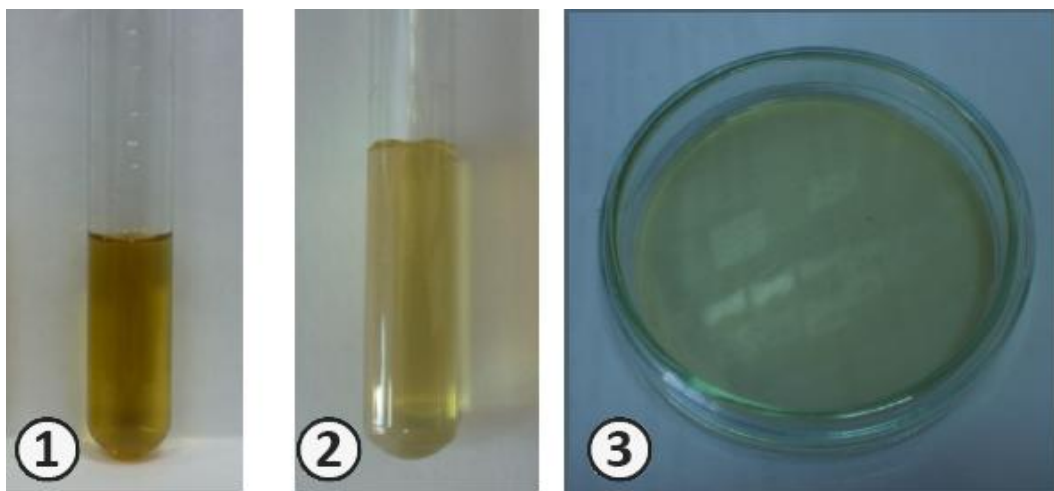


Рис. 1.8. Живильні середовища: 1 – рідке, 2 - напіврідке, 3 – щільне

Джерело:[28]

За складом живильні середовища поділяють на:

1) синтетичні - являють собою водні розчини хімічно чистих сполук у встановлених дозуваннях. Склад таких живильних середовищ повністю відомий, але використовуються вони для небагатьох видів невимогливих до харчування мікроорганізмів;

2) натуральні або природні - складаються з продуктів тваринного або рослинного походження. Хімічний склад таких середовищ складний і точно не визначений. До них відносять м'ясопептонний бульйон і агар, солодове сусло, сусло-агар, знежирене і гідролізоване молоко, відвари овочів.

За цільовим призначенням живильні середовища ділять на:

1) основні - застосовуються для вирощування багатьох бактерій. До них відносять м'ясопептонний бульйон (МПБ), триптичні гідролізати рибних, м'ясних продуктів, казеїну. Основні середовища служать для приготування складних живильних середовищ. До них додають молоко, цукор, кров та інші інгредієнти;

2) селективні (виборчі) - призначені для виділення і накопичення мікроорганізмів певних видів або груп з об'єктів, що містять різноманітну мікрофлору. Супутні мікроби або зовсім не ростуть на селективних середовищах або розвиток їх сильно пригнічується. Розробка таких живильних середовищ ґрунтується на біологічних особливостях конкретних мікроорганізмів, що відрізняють їх від багатьох інших;

3) диференційно-діагностичні - дозволяють швидко встановлювати і відрізнити групи мікроорганізмів один від одного. Їх склад підбирається з розрахунком чіткого виявлення характерних властивостей конкретного виду. У багатьох випадках це досягається введенням в середовища спеціальних барвників-індикаторів, що забарвлюють колонії мікробів в певні кольори.

За фізичним станом живильні середовища ділять на:

1) рідкі (бульйони) - використовують для накопичення біомаси бактерій, продуктів їх метаболізму та для виявлення фізіолого-біохімічних особливостей мікроорганізмів;

2) напіврідкі - живильні середовища, що містять від 0,08 до 0,7% агару;

3) щільні - готуються з рідких живильних середовищ, шляхом додавання желуючих речовин - агару або желатину (1,5-2,0%). Дані речовини при розчиненні в гарячій воді формують колоїдний розчин, що дає при охолодженні щільний гель (холодець). Студеподібні середовища можливо розплавити за допомогою нагрівання. Щільні середовища використовують для виділення чистих культур мікроорганізмів, в діагностичних цілях, для кількісного обліку мікроорганізмів, визначення, протеолітичної та антагоністичної активності;

4) сухі - випускаються спеціалізованими підприємствами, використовуються в мікробіологічних цілях. Перед використанням в них додають воду і стерилізують.

Для культивування мікроорганізмів використовують різні за складом живильні середовища. Але всі вони повинні відповідати ряду загальних вимог: містити повний набір речовин необхідних для харчування, вирощуваного мікроорганізму, в легко засвоюючій формі; володіти оптимальною вологістю, в'язкістю, кислотністю середовища (рН); бути ізотонічними (з осмотичним тиском рівним осмотичному тиску всередині клітини); по можливості - бути прозорими.

Основні компоненти будь-якого живильного середовища - джерела азоту і вуглецю. Їх кількісний показник є визначальною характеристикою більшості середовищ.

Автотрофні мікроби вимогливі до наявності вуглекислого газу, оскільки його концентрація в повітрі становить лише 0,03%. Для забезпечення живильних середовищ вуглекислим газом вносять зазвичай карбонат кальцію (CaCO_3), іноді - гідрокарбонат натрію (NaHCO_3), або інші карбонати. У деяких випадках через середовище продувають повітря, штучно збагачене вуглекислим газом до 1-5%.

Гетеротрофні організми успішно розвиваються на середовищах, що містять джерела вуглецю у вигляді органічних сполук. Залежно від

індивідуальних особливостей гетеротрофні мікроорганізми використовують різноманітні органічні сполуки - спирти, органічні кислоти, вуглеводи, вуглеводні, ароматичні з'єднання. Зазвичай в лабораторній практиці як джерело вуглецю застосовують глюкозу, оскільки саме це з'єднання вуглецю найлегше утилізується мікробами.

Потреби в джерелах азоту задовольняються азотовмісними сполуками, з різним ступенем азоту. В основному це солі амонію, які вносяться в живильне середовище в формі сульфатів і хлоридів. При використанні цих речовин необхідно враховувати їх високу фізіологічну кислотність, яка впливає на кислотність середовища і розвиток мікроорганізмів. Крім того, потреба в азоті задовольняється нітратами. Нітроти використовуються дуже рідко, оскільки токсичні для багатьох мікроорганізмів.

Не менш важливими фактором для побудови речовин мікробної клітини є сполуки фосфору, сірки, калію, магнію, кальцію та інших мікроелементів, які так само повинні міститися в живильному середовищі в доступній формі. Їх потреба задовольняється за рахунок мінеральних солей.

Потреба в сірці задовольняється сульфатами. У фосфорі - солями фосфорної кислоти. Всі необхідні метали та інші елементи - в формі катіонів або аніонів неорганічних солей. Зокрема, джерело магнію - сульфат магнію ($MgSO_4$), натрію - хлорид натрію або кухонна сіль ($NaCl$), кальцію - хлорид кальцію ($CaCl_2$) або карбонат кальцію ($CaCO_3$).

Для нормального розвитку мікробів, в тому числі бактерій, необхідні так звані фактори росту (амінокислоти, азотисті основи, вітаміни, жирні кислоти, залізопріни та багато інших сполук). Їх додають в живильні середовища в значно меншій кількості, ніж макроелементи.

Живильні середовища використовуються для:

- 1) виділення чистих культур бактерій з біогенних і абіогенних об'єктів;
- 2) для визначення культуральних і ферментативних властивостей мікробів;

3) для визначення стійкості мікробів до хімічних, біологічних і фізичних факторів;

4) для накопичення мікробної біомаси і продуктів біосинтезу;

5) для зберігання музейних культур.

Культивування, диференціація і виділення окремих видів мікроорганізмів стало можливим лише із застосуванням живильних середовищ. Описані компоненти, які створюють сприятливі умови для розмноження і росту певного виду бактерій і грибів, тобто чистих культур, що відкриває можливість вивчення їх властивостей та впливу на організм.

Сьогодні живильні середовища застосовуються як в медицині, так і в інших областях, наприклад, в харчовій промисловості, де використовуються різні види мікроорганізмів для поліпшення якості продуктів харчування, збільшення терміну придатності, смакових і ароматичних властивостей. Так, чисті культури, виділені за допомогою використання живильних середовищ, застосовуються на хлібопекарських виробництвах, у винно-горілчаній промисловості, при створенні сирів і молочних продуктів, для отримання органічних кислот, при квашенні та консервації овочів і фруктів, в фармакології, а також в сільському господарстві, в гідропоніці.

Правильно складений живильний розчин для гідропонних живильних систем забезпечує рослину усіма поживними елементами, які вона могла б взяти з високо плодового ґрунту.

Живильні розчини можуть циркулювати або періодично змінюватися. В умовах рециркуляційних систем важливо уникати накопичення органічних сполук вторинного метаболізму та продуктів життєдіяльності мікроорганізмів.

Таким чином, ефективне використання живильного середовища у гідропонних технологіях передбачає не лише його правильну рецептуру, а й активне керування фізико-хімічними параметрами середовища в динаміці.

1.5 Основні способи та методи оброблення живильних середовищ

Останні роки привернули увагу науковців до проблеми виявлення фізичних механізмів біологічної дії різних способів обробки та методів впливу на живильні середовища. Зовнішні чинники, хоч і мають низьку енергетичну потужність, здатні суттєво впливати на стан і поведінку біологічних об'єктів. Така особливість притаманна інформаційним впливам, коли інтенсивність реакції об'єкта залежить не стільки від енергетичної величини впливу, скільки від його інформаційної значущості для об'єкта. При цьому значну роль відіграє частка енергії метаболізму, яка спрямовується на формування відповідної реакції.

Вказані аспекти є ключовими для розуміння процесів, що відбуваються в живильних середовищах під час їх оброблення, та відкривають нові можливості для оптимізації гідропонних систем і підвищення їхньої ефективності.

Способи оброблення живильних розчинів поділяють на механічні, фізичні, хімічні, біологічні та комбіновані. Фізичні способи оброблення живильних середовищ здійснюються зовнішніми силовими полями, без додавання в робочий об'єм хімічних речовин. Використання хімічних способів пов'язано з використанням реагентів. На рис. 1.9 наведено класифікацію фізичних способів оброблення живильних середовищ [29].



Рис. 1.9. Класифікація фізичних способів оброблення рідких середовищ
Джерело: [29]

Проблема біологічної дії магнітних полів (МП) в останні роки стає особливо актуальною у зв'язку зі зростаючим електромагнітним забрудненням довкілля і через впровадження нових методів магнітотерапії для лікування захворювань людини. Встановлено позитивний вплив магнітного поля на розвиток і врожайність різних сільськогосподарських культур. Магнітне поле впливає на всі біологічні об'єкти, які в ньому знаходяться, - на воду, рослини, бактерії, тваринний світ і на людину.

Екранування від геомагнітного поля Землі різко погіршує життєдіяльність живих організмів і рослин. У той же час відомо, що напруженість геомагнітного поля Землі з кожним роком знижується.

В даний час відсутні загальновизнані теоретичні та експериментальні результати, пов'язані з відмінностями в біофізичних ефектах, що виникають при впливі полів N- і S-полісів магніту на біологічні об'єкти і, перш за все, на людину.

Багаторічні дослідження, проведені американськими дослідниками Девісом і Раулсом, показали, що магнітні поля північного і південного полюсів

уніполярних магнітів виявляють протилежні властивості при впливі на матеріальні об'єкти, включаючи рослини і тварин. Південний магнітний полюс прискорює клітинний ріст і біологічну активність, в той час як північний полюс, навпаки, робить зворотний вплив [30, с. 443].

Експерименти показали, що після експозиції МП північного полюса кількість ракових клітин скорочувалася і, навпаки, опромінення МП південного полюса призводило до їх зростання (порівняно з контрольними клітинами без впливу МП). Однак зроблені висновки були оскаржені в подальших дослідженнях інших авторів, і нині загальноновизнаної думки з цього питання не існує.

Таким чином, дослідження біофізичних ефектів уніполярних магнітних полів і області їх застосування в сільському господарстві та магнітотерапії, залишається актуальним.

Одним із чинників, що впливає на функціональний стан мікроорганізмів, є ультразвук (УЗ). Хоча ультразвук вже тривалий час застосовують у різних галузях науки, техніки та медицини, його вплив на мікроорганізми досі потребує глибшого дослідження. Ультразвукові хвилі мають значну механічну енергію, що спричиняє комплекс фізичних, хімічних та біологічних явищ, що пояснює зростаючий інтерес до вивчення впливу ультразвуку і механізмів його дії на біологічні об'єкти [31].

Ультразвуковими називають пружні акустичні хвилі, які здатні поширюватися в різних матеріальних середовищах – твердих, рідких чи газоподібних. Частотний діапазон ультразвуку коливається від 16-20 кГц до сотень мегагерц. Завдяки пружності середовища частинки, які зміщуються під впливом зовнішніх сил, повертаються до початкового положення. Водночас вони не переміщуються в напрямку поширення хвиль, а лише коливаються навколо точки рівноваги. Енергія передається від одного шару середовища до іншого без перенесення речовини.

Акустичні хвилі можуть бути поздовжніми (коли напрямок коливань збігається з напрямком поширення хвиль) або поперечними (коли напрямки

взаємно перпендикулярні). У газоподібних і рідких середовищах, а також у м'яких тканинах макроорганізмів та клітинах мікроорганізмів, які на 75% складаються з води, поширюються саме поздовжні хвилі.

Дані характеристики ультразвуку відкривають широкі можливості для дослідження його дії на біологічні об'єкти, зокрема мікроорганізми, що є важливим для розробки нових методів їхнього контролю і впливу.

Під час проходження ультразвукових (УЗ) хвиль через біологічні об'єкти частинки середовища здійснюють інтенсивні коливальні рухи з високими прискореннями. На відстанях, що дорівнюють половині довжини хвилі, в опроміненому середовищі можуть утворюватися значні перепади тиску – від одиниць до десятків атмосфер. Такий вплив на структуру біологічних об'єктів зумовлює різноманітні ефекти, що пов'язані з механічними, тепловими та фізико-хімічними чинниками, які супроводжують поширення ультразвуку в середовищі.

Одним із механізмів впливу УЗ на живильні середовища є звукохімічні реакції. Хімічні перетворення спостерігаються при інтенсивності ультразвуку від часток ват на квадратний сантиметр до десятків чи сотень ват на квадратний сантиметр у частотному діапазоні від 1 кГц до кількох МГц. Оскільки ці частоти є значно нижчими за власні частоти коливань молекул, резонансне поглинання УЗ не викликає хімічних змін у системі, а зміна частоти в зазначеному діапазоні мало впливає на характер реакцій, що виникають у біосистемах [32, с. 69].

Особливу увагу у вивченні впливу ультразвуку приділяють явищу кавітації. Кавітація – це процес утворення у рідкому середовищі порожнин, заповнених парами рідини, які виникають під впливом значних розриваючих напружень і швидко закриваються, створюючи високі тиски та локальне нагрівання середовища. Кавітація є локальним явищем, що не поширюється у середовищі, але її наслідки є значними. Імпульси тиску, що виникають під час змикання каверн, здатні руйнувати не лише тверді чи рідкі об'єкти, але й біологічні структури, включаючи мікроорганізми.

Описані явища демонструють перспективність використання ультразвуку для модифікації живильних середовищ у гідропонних системах, забезпечуючи ефективні фізико-хімічні зміни середовища для оптимізації умов вирощування рослин.

Хімічна дія ультразвуку під час кавітації пояснюється можливістю утворення електричних мікрочарядів на стінках кавітаційних порожнин, що може спричиняти електронний пробій. Проте цей механізм не дає змоги пояснити всі експериментальні спостереження. Більш обґрунтованим є тепловий механізм хімічної дії, оскільки під час стиснення кавітаційних пухирців температура всередині них може сягати 95°C.

Більшість хімічних перетворень за дії ультразвуку відбувається у водних розчинах. При високих температурах молекули води всередині кавітаційних пухирців переходять у збуджений стан і розпадаються на радикали H^+ і OH^- , а також, ймовірно, іонізуються з утворенням гідратованих електронів – електронів, зв'язаних з молекулами води. Частина радикалів рекомбінує, при цьому кінцевий склад радикальних і молекулярних продуктів розпаду води залежить від газу, розчиненого у воді. Наприклад, у воді з розчиненим повітрям утворюються оксиди азоту й перекис водню [33, с. 25].

Ультразвук також здатен прискорювати хімічні реакції, особливо ті, що відбуваються за участю H_2O_2 , H^+ та атомарного кисню. Прискорення реакцій зумовлене фізико-хімічними ефектами, такими як ультразвукова дегазація, диспергування, емульгування, локальне нагрівання при кавітації тощо. Зокрема, ультразвук сприяє детонації дихлористого азоту та розщепленню білкових частинок. Таким чином, ультразвукові коливання можуть використовуватись для ініціювання хімічних реакцій, розробки нових методів синтезу та прискорення повільних органічних реакцій.

Окрім хімічного впливу, ультразвук має також механічний вплив на біологічні об'єкти, що залежить від інтенсивності та тривалості опромінення. При малих інтенсивностях (до 2-3 Вт/см²) на частотах 10⁵-10⁶ Гц ультразвук створює мікромасаж тканин, який сприяє покращенню обміну речовин. Зі

збільшенням інтенсивності ультразвукові коливання викликають кавітацію, що може призводити до механічного руйнування клітин і тканин. Газові бульбашки, які завжди присутні у рідині, слугують «зародками» кавітації.

Властивості ультразвуку відкривають широкі можливості для його використання в модифікації живильних середовищ, зокрема в гідропонних системах, де оптимізація фізико-хімічних характеристик середовища є ключовою для забезпечення ефективного росту рослин.

При поширенні ультразвукових хвиль у біологічних середовищах відбувається їх поглинання з перетворенням акустичної енергії на теплову. Теплове утворення є нерівномірним, найпомітніше проявляючись на межах середовищ з різними акустичними імпедансами. Значне підвищення інтенсивності або тривалості дії УЗ може призводити до надмірного нагрівання тканин і їх руйнування.

Крім теплового ефекту, вплив УЗ супроводжується вторинними фізико-хімічними ефектами. Одним із них є акустичні потоки, що спричиняють перемішування мікроскопічних внутрішньоклітинних структур. Також, під час кавітації в середовищі відбувається розрив молекулярних зв'язків і утворення вільних радикалів OH і H^+ , які виступають ключовими агентами впливу УЗ. Зокрема, ультразвук сприяє розщепленню високомолекулярних сполук, таких як крохмаль, нуклеїнові кислоти та білкові речовини, у клітинах.

Особливу увагу привертає вплив УЗ на клітинні мембрани. Дія ультразвуку може значно змінювати механічні, електричні та інші властивості мембран, а також порушувати внутрішньоклітинний склад, включаючи концентрації речовин у цитоплазмі. При тривалому впливі наслідки зберігаються деякий час після завершення опромінення, і відновлення клітинних функцій може зайняти хвилини, години або навіть дні [34, с.111].

Найбільш вираженим ефектом УЗ є механічне пошкодження клітинних мембран, що призводить до втрати цілісності клітин і їх загибелі. Особливо небезпечним є низькочастотний ультразвук, який здатний механічно розривати мембрани і викликати загибель мікроорганізмів. Проте такі

наслідки спостерігаються лише при високих інтенсивностях, які значно перевищують фізіологічно допустимі дози.

Таким чином, вплив ультразвуку на біологічні об'єкти є складним і багатогранним процесом, що включає теплові, механічні та фізико-хімічні ефекти, що робить його перспективним інструментом для модифікації живильних середовищ і знищення небажаних мікроорганізмів, однак вимагає ретельного контролю параметрів, щоб уникнути небажаних пошкоджень.

Зміна властивостей клітинних мембран під дією ультразвуку обумовлена, насамперед, «відривом» макромолекул та молекулярних комплексів від зовнішньої поверхні мембрани. Відривання призводить до розчинення цих з'єднань у навколишньому середовищі, а згодом, після припинення ультразвукового впливу, вони можуть повернутися на своє колишнє місце. Внаслідок цього мембрана втрачає певні складові, що змінює її функціональні характеристики, зокрема провідність і проникність для молекул. Як результат, мембрана починає аномально функціонувати, що може спричинити порушення життєдіяльності клітини.

У деяких бактерій ультразвук може викликати генерацію мембраною електричного потенціалу дії, що є наслідком зміни її електричних властивостей. Порушення є вимушеним і виникає через зміни в структурі і функціях мембран під впливом ультразвукового випромінювання [35, с. 325].

Іншим важливим ефектом є зміна концентрації різних речовин у клітині через порушення рівноваги концентрацій всередині і поза клітиною. Ультразвукові хвилі створюють мікровіхрі, що забезпечують ефективне перемішування середовища і сприяють наближенню концентрацій речовин у живильному середовищі, зокрема іонів легких металів, до рівня концентрацій, що існують поза клітиною, що робить клітину більш чутливою до складу зовнішнього середовища, що може порушити внутрішні метаболічні процеси та змінити життєдіяльність клітин.

Таким чином, під дією ультразвуку може відбуватися порушення цілісності клітини, зміна властивостей її мембрани, а також порушення

процесів, що відбуваються всередині клітини. Це призводить до змін у внутрішньому складі клітини та до тривалих порушень її життєдіяльності, які можуть зберігатися ще кілька годин або навіть днів після припинення ультразвукового впливу.

Згодом було опубліковано багато робіт про ефекти ультразвуку на бактерії і віруси, і результати виявилися різноманітними. В одних випадках спостерігалася аглютинація, втрата вірулентності або повна загибель бактерій, а в інших – навпаки, збільшення кількості життєздатних клітин, особливо після короткочасного опромінення. Ймовірно, що короткочасне опромінення може сприяти механічному розподілу скупчень бактерій, що дозволяє кожній окремій клітині розвиватися в нову колонію [36, с. 548].

Кавітаційно-електрохімічна теорія описує процес іонізації парів рідин та газів, що містяться в них, під час утворення кавітаційного бульбашки. Коли бульбашка розривається, відбувається електричний розряд, що супроводжується різким підвищенням температури та виникненням електричного поля високої напруги в порожнині. Внаслідок цього пари рідини та високомолекулярні сполуки розщеплюються на водень і гідроксильну групу, утворюючи активний кисень, перекис водню, азотисту та азотну кислоту, що викликає інактивацію ферментів та коагуляцію білків, що призводить до загибелі мікробних клітин. Особливо небезпечним для мікробів є низькочастотний ультразвук (від 20 до 100 кГц), що здатен викликати їх дезінтеграцію [37, с. 441].

Руйнівний вплив ультразвуку поширюється не лише на бактерії, але й на певні типи вірусів. Ультразвукові хвилі з частотою 1-1,3 МГц протягом 10 хвилин проявляють бактерицидний ефект на зазначені мікроорганізми, що дає можливість використовувати ультразвук для інактивації та дезінтеграції вірусів і інших мікроорганізмів, зокрема для отримання антигенів, вакцин та діагностикумів. Під впливом ультразвуку на бактерії можна виділяти не лише антигени, а й токсини. Більш того, ультразвуковий вплив на токсини

патогенних мікроорганізмів може змінювати їх біологічні властивості, що має важливе значення для боротьби з небезпечними інфекціями [38, с. 927].

Останнім часом до ультразвукових технологій проявляється підвищений інтерес не тільки через їхній прямий вплив на біологічні об'єкти у живильних середовищах, але й завдяки можливості застосування цих технологій для зміни фізико-хімічних властивостей субстратів для культивування мікроорганізмів. Зокрема, ультразвукова дегазація дозволяє регулювати склад штучних живильних середовищ, зокрема концентрацію та активацію молекулярного кисню.

Наразі ультразвукові технології є перспективними для розробки імунобіологічних препаратів нового покоління, оскільки процеси кавітації можуть використовуватися для переміщення біомолекул всередину бактеріальних клітин, що дозволяє змінювати їх біологічні властивості.

Альтернативою традиційним методам підготовки живильних розчинів, що ґрунтуються на механічному перемішуванні, термічному знезараженні чи використанні хімічних стабілізаторів, є гідродинамічне оброблення. Цей підхід базується на дії турбулентних потоків і кавітаційних явищ, які виникають у середовищі під час його пропускання через спеціальні апарати. Завдяки такому впливу розчин набуває високого ступеня гомогенізації, поживні компоненти рівномірно розподіляються по всьому об'єму, а локальні зони концентрацій чи дефіциту елементів зникають. Крім того, інтенсивний рух рідини сприяє руйнуванню мікробних агломератів і біоплівки, що значно знижує ризики мікробіологічного зараження. Важливою перевагою цього методу є й часткове знезараження розчинів, яке досягається без використання додаткових хімічних речовин, а також здатність впливати на ключові фізико-хімічні характеристики: окисно-відновний потенціал і кислотно-лужний баланс. Завдяки цьому середовище стає стабільнішим, довше зберігає свої властивості та потребує меншої кількості стабілізаторів і реагентів.

Подальшим розвитком гідродинамічного підходу стало впровадження методу дискретно-імпульсного введення енергії, який нині вважають

найбільш перспективним напрямом удосконалення технологій оброблення живильних розчинів. Сутність методу полягає у періодичному, дозованому введенні енергії в робочу рідину. У процесі цього впливу у середовищі виникають зони локального високого тиску, формуються імпульсні мікропотоки та реалізується ефект мікрофільтрації. Поєднання кавітаційних, турбулентних та імпульсно-енергетичних явищ забезпечує глибоку гомогенізацію живильних середовищ у надзвичайно короткі терміни. Водночас стає можливим кероване коригування фізико-хімічних параметрів, таких як кислотність, окисно-відновний потенціал та вміст розчиненого кисню, причому цей ефект досягається без залучення додаткових реагентів. Значним здобутком є також здатність методу знижувати мікробіологічне навантаження: під дією імпульсної енергії руйнуються клітинні структури частини мікроорганізмів, а також їхні біоплівки, що сприяє стерильності та довготривалій стабільності розчинів.

Окрім науково-технічних переваг, метод ДІВЕ має виразну економічну цінність. Його використання супроводжується зменшенням витрат енергії та ресурсів у порівнянні з традиційними способами, адже досягається високий результат за короткий час і без потреби у додатковій хімічній обробці. Водночас він відзначається екологічною безпечністю, оскільки в оброблене середовище не вносяться сторонні домішки, а корекція параметрів відбувається природним фізичним шляхом. Саме ця комбінація ефективності, економічності й екологічності робить метод дискретно-імпульсного введення енергії одним із найперспективніших інструментів для сучасних технологій підготовки та підтримання якості гідропонних живильних розчинів.

Дослідження ефективності інактивації мікроорганізмів під дією кавітаційних ефектів підтверджують, що, поряд з традиційними методами інактивації, застосування кавітаційної обробки є ефективним, особливо коли початкове забруднення знаходиться в межах значень $C \leq 103$ ос./см³.

Механізм комплексної дії гідродинамічного оброблення був підтверджений експериментально через дослідження структурно-

морфологічних змін, що виникають у мікробних клітинах *E. coli* під час кавітаційної обробки в пристрої динамічного типу. Результати мікроскопічного аналізу демонструють, що за певних умов обробки рідинного середовища в кавітаційному полі спостерігаються такі зміни, як зниження контрастності клітин, пошкодження їх оболонок, зокрема їх розрихлення, зменшення чіткості контурів, зміна форми клітин, їх агрегація та механічне руйнування.

Зменшення мікробного навантаження призводить до підвищення ефективності інактивації мікроорганізмів. Проте інтенсивність інактивації залежить від початкового рівня мікробного завантаження, а також обмеження можливості досягти концентрацій, менших за гранично допустимі концентрації забруднювачів лише за допомогою гідродинамічного оброблення [39, с. 377].

На думку деяких дослідників, значно більші перспективи застосування гідродинамічного оброблення з'являються у випадку, коли основною метою є збільшення поверхні масообміну біологічних об'єктів для подальших технологічних процесів, таких як екстрагування чи біохімічні перетворення, без необхідності досягнення певних конкретних параметрів обробленого середовища [40, с. 540].

Оброблення живильних середовищ у сучасних агротехнологіях передбачає застосування різноманітних фізико-хімічних методів, які забезпечують підвищення ефективності росту рослин та контролю за якістю середовища.

1.6 Застосування методу дискретно-імпульсного введення енергії для оброблення живильних середовищ

Вода є фундаментальним середовищем, у якому відбуваються більшість життєво важливих біохімічних та фізико-хімічних процесів. У межах гідропонних систем вона виконує не лише роль транспортного агента для

мінеральних солей і мікроелементів, а й слугує ефективним носієм теплової енергії, забезпечуючи регуляцію температурного балансу у кореневій зоні.

Якість води як основи живильного середовища визначає ефективність гідропонного виробництва, впливаючи як на засвоюваність поживних речовин, так і на стабільність рН та окисно-відновного потенціалу. У сучасних умовах, зокрема внаслідок зростаючого антропогенного навантаження, деградації природних водойм і руйнування критичної інфраструктури в зоні бойових дій, проблема очищення, рециркуляції та стабілізації водних розчинів у сільськогосподарському секторі набуває стратегічного значення. Особливо це стосується гідропоніки, де об'єм води є обмеженим, а її параметри – критично чутливими до найменших змін.

У світлі викликів XXI століття, пов'язаних із дефіцитом якісної води, зростає потреба в інноваційних технологіях, які не лише оптимізують склад живильного середовища, а й підвищують ефективність його фізичних властивостей, зокрема здатність до швидкої тепловіддачі та інтенсивного масообміну. Одним із перспективних рішень у цьому напрямі є впровадження методів гідродинамічного оброблення, що дозволяють активізувати мікропотoki, зруйнувати агреговані частинки, посилити розчинення газів, а також стабілізувати температуру у контурі циркуляції.

Живильне середовище у гідропоніці розглядається не лише як хімічна система, а як динамічна термогідродинамічна структура, де кожен параметр – рН, ОВП, температура, концентрація іонів – є взаємопов'язаним із режимами потоку, турбулентністю та теплопровідністю. Саме тому оптимізація цих характеристик через керовані кавітаційні процеси може бути інструментом ефективного управління агрофізіологічними умовами вирощування рослин у техногенно-чутливих середовищах.

Таким чином, дослідження й удосконалення методів керування живильними середовищами через інтенсифікацію тепломасообміну має не лише агротехнічне, а й екологічне та стратегічне значення.

Одним із найперспективніших підходів до інтенсифікації тепломасообміну в рідких середовищах, що циркулюють у замкнених гідропонних системах, є технологія дискретно-імпульсного введення енергії (ДІВЕ). Суть цього методу полягає у періодичному передаванні в систему короткочасних, але високоінтенсивних енергетичних імпульсів, що генерують локальні гідродинамічні, кавітаційні та термомеханічні ефекти. У контексті живильного середовища це забезпечує суттєве покращення його фізико-хімічних властивостей, сприяючи як масопереносу, так і рівномірному розподілу активних компонентів.

Механізм дії ДІВЕ базується на створенні нерівноважних умов у потоці, що зумовлює формування пульсуючих мікротечій, мікрокавітаційних бульбашок, локального зсуву температурного градієнта та тимчасового зниження в'язкості середовища. У результаті відбувається руйнування іонних кластерів, активація молекулярного руху, підвищення ступеня гомогенізації розчину та покращення проникності іонів крізь клітинні мембрани кореневої системи рослин, що сприяє підвищенню біодоступності поживних елементів, а й знижує ймовірність утворення зон застою або солевих агрегатів у системі.

У статті [41, с. 142] проведено дослідження впливу чергування тиску на фізико-хімічні властивості розчинів, показуючи, що метод ДІВЕ здатен збільшити рН на 15–16,5 % та значно покращити редокс-потенціал (ОРП), не вдаючись до хімічних стабілізаторів. Експерименти демонструють, що технологія може бути вбудована у гідропонні системи з метою підвищення якості живильного середовища.

Автори [42, с. 343] деталізовано моделюють гідродинамічні умови, за яких імпульси тиску забезпечують потрібний рівень активації рідини. Розглядаються параметри ΔP , частота імпульсів, формування кавітаційних мікроструктур – усе це релевантно для оптимізації живильних середовищ у гідропоніці.

Дана робота [43, с. 75] присвячена застосуванню методу дискретно-імпульсного введення енергії саме для води в гідропонних установках.

Представлено технічну модель установки, експериментальні дані щодо підвищення рН, редокс-потенціалів і продуктивності рослин без додаткових хімічних реагентів.

Описані дослідження підтверджують ефективність методу дискретно-імпульсного введення енергії для покращення фізико-хімічних параметрів живильних середовищ у гідропоніці. Зокрема, застосування чергування тиску дозволяє значно підвищити рівень рН (на 15–16,5 %) та покращити окисно-відновний потенціал (ОРП) розчинів без використання хімічних стабілізаторів, що є важливим для підтримання оптимальних умов росту рослин [44, с. 85].

Моделювання гідродинамічних умов свідчить, що контрольовані параметри імпульсів тиску, частота їхнього застосування та утворення кавітаційних мікроструктур відіграють ключову роль у активації рідинного середовища, що може бути адаптовано до конкретних вимог гідропонних систем.

Практична реалізація цієї технології підтверджена експериментальними даними, які демонструють підвищення продуктивності рослин без застосування додаткових хімічних реагентів, що відкриває перспективи для екологічно безпечного та ефективного управління якістю живильних розчинів у закритих аграрних системах [45, с. 59].

На практиці метод ДІВЕ реалізується за допомогою роторно-пульсаційних апаратів, гідродинамічних кавітаторів циліндричного типу або мембранно-імпульсних генераторів, які вбудовуються в циркуляційний контур живильного середовища. Завдяки компактності й універсальності обладнання, його легко інтегрувати в існуючі гідропонні системи, включаючи NFT, крапельне зрошення або системи періодичного затоплення [46, с. 47].

Таким чином, метод дискретно-імпульсного введення енергії є ефективним інструментом для глибокої модифікації властивостей водно-сольового розчину, що дозволяє не лише інтенсифікувати тепломасообмін у критичній для рослини прикореневій зоні, але й знизити енергоємність

процесу за рахунок зменшення потреби у додаткових реагентах або термічній обробці. Його застосування відповідає концепціям ресурсоефективного, сталого та екологічно безпечного агровиробництва.

1.6 Вибір напрямку дослідження

Сучасний розвиток технологій контрольованого вирощування рослин, зокрема у системах гідропоніки, висуває нові вимоги до ефективності використання ресурсів, стабільності параметрів живильних середовищ та інтенсифікації фізико-хімічних процесів у прикореневій зоні. Основним обмежувальним чинником у безґрунтових технологіях є обмежена тепло- та масопереносна здатність водно-сольового розчину, зниження якої призводить до уповільнення засвоєння елементів живлення, нестабільності рН і редокс-потенціалу, а також до локального перенасичення або дефіциту компонентів у гідропонному контурі.

Водночас, результати низки досліджень свідчать про високу чутливість корневих систем до мікроциркуляційних процесів, розчиненого кисню, температурних градієнтів і структурного стану води. У цьому контексті зростає науковий і практичний інтерес до використання фізичних методів активізації живильного середовища, зокрема гідродинамічної кавітації, імпульсного тиску та енергомеханічної обробки. Такі методи здатні змінювати властивості середовища без хімічного втручання, що відповідає принципам сталого агровиробництва.

Зважаючи на це, пріоритетним напрямом дослідження було обрано вивчення процесів масообміну в живильних середовищах гідропонних систем, шляхом гідродинамічного оброблення за умов застосування дискретно-імпульсного введення енергії. Даний підхід дозволяє цілеспрямовано модифікувати гідродинамічні й теплові параметри розчину, активізувати конвективні й дифузійні механізми переносу, зменшити ефекти стратифікації, підвищити розчинність кисню, а також покращити біодоступність елементів живлення.

На вибір тематики вплинули також результати попередніх теоретичних досліджень і прикладних експериментів, що демонструють високу ефективність гідродинамічної кавітації в харчовій та водоочисній галузях, а також її перспективність для біотехнологій, зокрема – в умовах замкнених циркуляційних систем. Використання методу дискретно-імпульсного введення енергії дозволяє досягти не лише якісного перемішування та активації розчину, а й керованої інтенсифікації локального теплового режиму без перегріву або порушення структурної цілісності компонентів.

Отже, напрям дослідження обумовлений актуальністю задач енергетичної та хімічної оптимізації процесів у гідропоніці, екологічними та технологічними викликами сучасного аграрного виробництва, а також науковою новизною застосування ДІВЕ для створення стабільного та високоефективного живильного середовища.

Актуальність роботи обумовлена необхідністю розробки і впровадження у вирощування сільськогосподарської продукції нових більш досконалих теплофізичних процесів обробки живильних середовищ. Завдання, які вирішуються даним дослідженням, є також частиною проблеми енергоресурсозбереження, або енергоефективності виробництв. Їх можна вирішити використовуючи тепломасообмінні, термодинамічні та інші ефекти, які проявляються в двофазних суперкавітаційних потоках. Використання теплофізичних і гідродинамічних ефектів кавітації сприяє механотермолізу структури води з появою вільних водневих зв'язків, диспергації та гомогенізації твердих і органічних включень.

Результати аналітико-синтетичної обробки інформації по проблемах дозволили встановити, що:

- на ринку не має якісного, біологічно цінного живильного середовища для гідропонних систем;
- якість живильного середовища для вирощування рослин гідропонним способом та його біологічна цінність залежить від інноваційних підходів та новітніх технологій в галузі;

Кількість робіт, присвячених вивченню гідродинамічного оброблення біологічних об'єктів гідропонних живильних систем, в доступних базах даних не виявлено.

У зв'язку з чим, метою дисертаційної роботи було вивчення інтенсифікація масообміну в живильних середовищах, шляхом гідродинамічного оброблення із застосуванням методу дискретно-імпульсного введення енергії.

Для досягнення мети було поставлено такі завдання:

1. Провести комплексні аналітичні дослідження способів одержання живильних середовищ, а саме гідропонних розчинів.
2. Розробити методику, розрахувати та створити експериментальний стенд для дослідження впливу режимів дискретно-імпульсного введення енергії на оброблення живильних середовищ, а саме гідропонних розчинів.
3. Визначити закономірності масообміну, у живильних середовищах при застосуванні методу ДІВЕ.
4. Встановити вплив гідродинамічного оброблення на фізико-хімічні параметри живильних середовищ, а саме гідропонних розчинів.
5. Розробити практичні рекомендації з використання отриманих результатів в технологіях одержання живильних середовищ.
6. Розробити енергоенергоощадну технологію одержання живильних середовищ із застосуванням методу дискретно-імпульсного введення енергії.

Висновки за розділом

Ключові теоретичні аспекти обробки живильних середовищ передбачають вплив фізико-хімічних процесів на біологічні об'єкти, що є важливим для розвитку сучасних технологій. Поглиблене вивчення різноманітних методів обробки дозволяє зрозуміти основи їхнього впливу на мікроорганізми, клітини та їхні структури, що є важливим для забезпечення ефективності багатьох технологічних процесів у різних галузях, зокрема в аграрному виробництві та біотехнологіях. Розглянуті технології мають

значний потенціал для удосконалення обробки живильних середовищ, відкриваючи нові можливості для покращення результатів у багатьох технологічних процесах.

Особливу увагу було приділено гідродинамічному обробленню як технології, що впливає на мікроорганізми та клітини, підвищуючи ефективність процесів стерилізації та активізації біологічних функцій.

Гідродинамічне оброблення може бути ефективним для зменшення мікробного навантаження, існують обмеження щодо досягнення концентрацій забруднювачів, нижчих за гранично допустимі значення, тільки за допомогою цього процесу.

Перспективи використання гідродинамічних технологій також мають значний потенціал, оскільки вони дозволяють регулювати фізико-хімічні властивості живильних середовищ, зокрема активацію молекулярного кисню, що сприяє покращенню умов для зростання мікроорганізмів або ефективності процесів біоекстракції та перетворення органічних сполук. Крім того, використання таких технологій є енергетично ефективним, оскільки вони дозволяють досягти високих результатів при менших енергетичних витратах порівняно з традиційними методами обробки.

Таким чином, дослідження в галузі обробки живильних середовищ дозволяють зробити важливі кроки вперед у розробці більш ефективних та економічно вигідних технологій, що можуть стати основою для майбутніх досягнень у сільському господарстві та інших галузях, де використовується біотехнологічний підхід.

РОЗДІЛ 2

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРОДИНАМІЧНОГО ОБРОБЛЕННЯ ГІДРОПОННИХ ЖИВИЛЬНИХ СЕРЕДОВИЩ

2.1 Опис експериментальної установки

Для проведення досліджень з інтенсифікації процесів масообміну було використано роторно-пульсаційний апарат (РПА) циліндричного типу, розроблений в Інституті технічної теплофізики НАН України. Тип апарата було обрано з урахуванням його високого потенціалу у створенні інтенсивного турбулентного та пульсаційного середовища, що є критичним для досліджуваних процесів у гідропонних системах.

Роторно-пульсаційний апарат складається з ротора і статора, між якими утворюються кільцеві щілини з малими розмірами (ширина — близько $3 \cdot 10^{-3}$ м, висота — $50 \cdot 10^{-3}$ м). У робочих елементах закладено по 60 таких щілин, що формують регулярний періодичний профіль. Внутрішній радіус робочих елементів змінюється в межах 0,055–0,085 м, а зовнішній — 0,065–0,09 м. Це створює вузьку зону проходження рідини, де формується максимальний гідродинамічний ефект [47, с. 142].

Коли ротор обертається зі швидкістю до 6000 обертів за хвилину, рідина, що надходить у робочий простір, багаторазово проходить крізь вузькі щілини між ротором і статором. У цей момент у потоці формується складний комплекс гідродинамічних явищ. Завдяки високій відносній швидкості виникає періодичне зрізування потоку, що супроводжується чергуванням зон підвищеного і зниженого тиску, внаслідок чого частинки розчину зазнають імпульсних навантажень. Додатково у вузьких каналах формується потужна турбулізація, яка знищує локальні градієнти концентрації та забезпечує швидке перемішування.

У зонах локального розрідження розвиваються гідродинамічні процеси: мікроскопічні бульбашки, що виникають у потоці, миттєво схлопуються і генерують мікроудари, які вивільняють додаткову енергію, руйнуючи

агрегати речовини та сприяючи їх диспергуванню. Сукупність цих процесів створює гідродинамічні мікропульсації, що діють на систему як серія багаторазових ударних імпульсів. Усе це різко підвищує інтенсивність масообміну, сприяє гомогенізації та утворенню стабільного середовища з високим рівнем дисперсності.

У результаті таких процесів рідина набуває високого ступеня гомогенності. Всі мікронутрієнти, які подаються в систему, рівномірно диспергуються, утворюючи стабільний розчин без великих агломератів. Це важливо для гідропонних живильних середовищ, адже рослини отримують збалансоване живлення у вигляді однорідного розчину з однаковою концентрацією по всьому об'єму [48, с. 62].

Крім того, через пульсаційні навантаження молекулярні асоціати можуть частково руйнуватися, що підвищує біодоступність поживних речовин. Інтенсифікація масообміну відбувається в десятки разів швидше порівняно зі звичайним змішуванням у мішалкових апаратах.

Завдяки своїй конструкції роторно-пульсаційний апарат поєднує в собі функції гомогенізатора, диспергатора та активатора середовища. Він не лише змішує компоненти, а й змінює фізико-хімічний стан розчину, створюючи стабільні колоїдні системи з високим рівнем дисперсності. Це особливо цінно для гідропоніки, де ефективність росту рослин безпосередньо залежить від рівномірності та доступності поживних речовин у середовищі [49, с. 75].

У табл. 2.1 наведено технічні характеристики робочих елементів роторно-пульсаційного апарату, які були застосовані в дослідженні.

Таблиця 2.1

Технічні характеристики робочих елементів роторно-пульсаційного апарату

| Робочі елементи | | Внутрішній радіус, м | Зовнішній радіус, м | Кількість щілин, шт. | Ширина щілин, 10^{-3} , м | Висота щілин, 10^{-3} , м |
|---------------------------------|----------|----------------------|---------------------|----------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| С Т А Т О Р И | Статор 1 | 0,06 | 0,065 | 60 | 3 | 50 |
| | Статор 2 | 0,07 | 0,075 | 60 | 3 | 50 |
| | Статор 3 | 0,08 | 0,085 | 60 | 3 | 50 |
| Р О Т О Р И | Ротор 1 | 0,055 | 0,06 | 60 | 3 | 50 |
| | Ротор 2 | 0,065 | 0,07 | 60 | 3 | 50 |
| | Ротор 3 | 0,075 | 0,08 | 60 | 3 | 50 |
| | Ротор 4 | 0,085 | 0,09 | 60 | 3 | 50 |

Джерело: складено автором

Оскільки в роботі пропонується вирощування рослинної продукції в умовах закритого ґрунту, то з метою реалізації поставлених завдань було обрано гідропонний спосіб на інертному носії (ґрунті). Під час такого вирощування живильне середовище відіграє визначальну роль.

З метою дослідження впливу гідродинамічного оброблення на фізико-хімічні параметри живильного середовища була розроблена та використана лабораторна експериментальна установка. Основне призначення установки – створення умов для реалізації дискретно-імпульсного введення енергії у рідинне середовище з можливістю контролю гідродинамічних параметрів потоку, зокрема тиску, частоти імпульсів та турбулентності. Такий підхід дозволяє моделювати режими, що є характерними для кавітаційних і

турбулентних зон, які виникають у процесі циркуляції рідини крізь реакційну камеру (рис. 2.1).

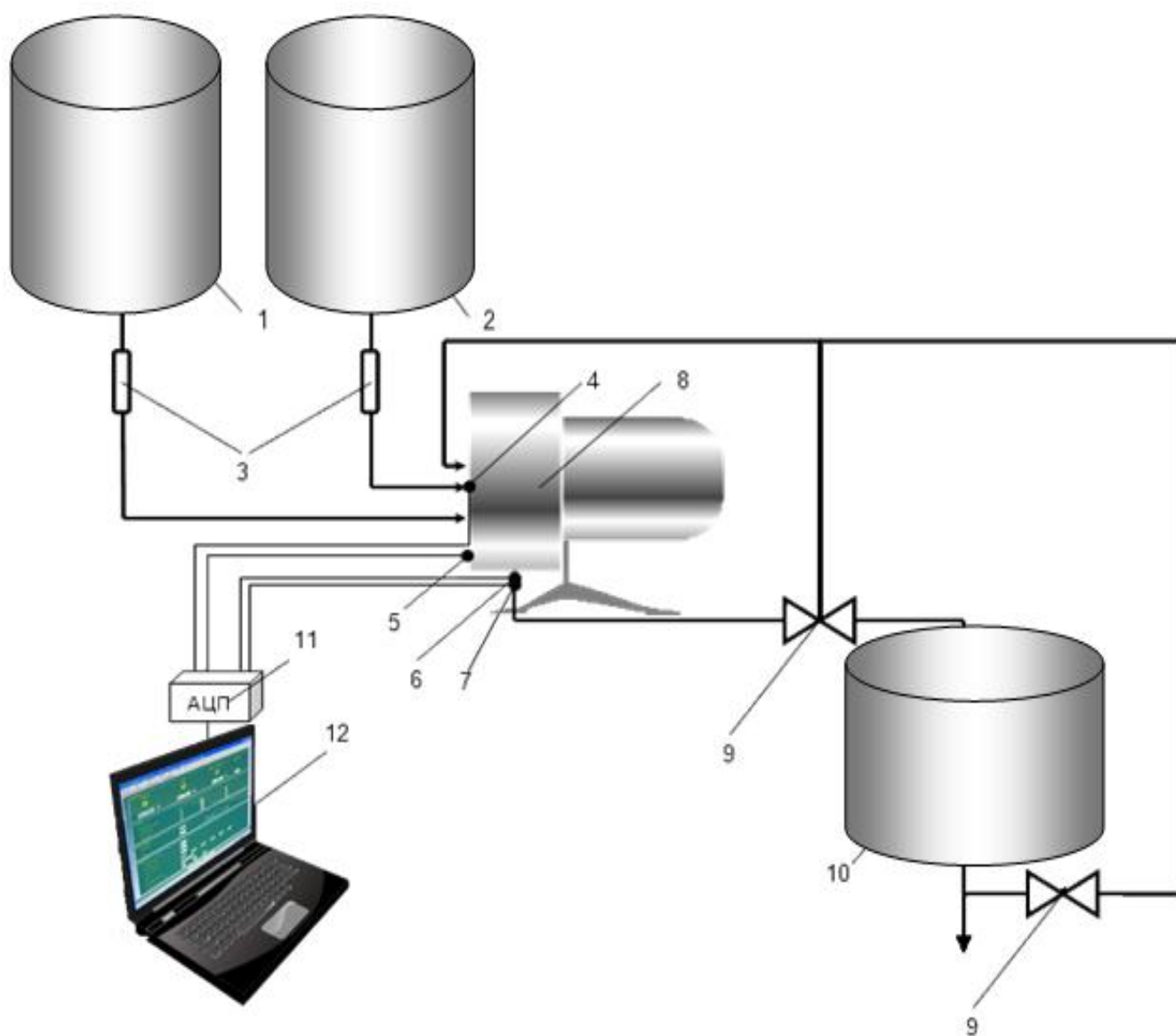


Рис. 2.1 Спрощена схема експериментального обладнання:

1 – ємність з водою; 2 – ємність з мікронутрієнтами; 3 – витратоміри; 4 – термопари; 5 – перетворювач тиску; 6 – термопара; 7 – перетворювач тиску; 8 – роторно-пульсаційний апарат; 9 – вентиль; 10 – ємність з живильним гідропонним середовищем; 11 – аналого-цифровий перетворювач; 12 – персональний комп'ютер.

Джерело: [50, с. 67]

Під час експерименту вода з ємності (1) та мікронутрієнти з ємності (2) подаються через витратоміри (3), які забезпечують точне дозування, у змішувальну камеру роторно-пульсаційного апарата (8). У процесі обробки, за рахунок високої турбулентності та пульсаційних коливань у камері апарата, відбувається інтенсивне гомогенне змішування речовин.

Параметри процесу – температура і тиск – фіксуються за допомогою термопар (4, 6) та перетворювачів тиску (5, 7). Дані через АЦП (11) надходять на персональний комп'ютер (12), де зберігаються й аналізуються. Живильне середовище після обробки прямує до накопичувальної ємності (10) через вентиль (9), який регулює тривалість подачі відповідно до умов експерименту (5–30 хв).

Таким чином, застосування роторно-пульсаційного апарата в гідропонних системах не лише підвищує ефективність змішування мікронутрієнтів з водою, але й змінює фізико-хімічні властивості розчину, створюючи сприятливі умови для підвищення біодоступності поживних речовин, що підтверджує перспективність використання даної технології для інтенсифікації процесів приготування живильних середовищ та забезпечення стабільності їх складу.

2.2 Опис методик проведення експериментального дослідження

Експериментальні дослідження проводилися в лабораторних умовах з використанням спеціально сконструйованого стенда, що імітує умови функціонування гідропонної системи замкнутого типу. Лабораторна установка функціонувала в режимі безперервної циркуляції середовища, що дозволяло забезпечити постійність гідродинамічних параметрів протягом усього циклу оброблення та гарантувало репрезентативність отриманих результатів. Основним функціональним елементом системи був роторно-пульсаційний апарат, налаштований на створення інтенсивних пульсацій у живильному середовищі з метою ініціації фізико-хімічних змін, зокрема –

покращення масообміну, диспергування, а також активації процесів розчинення й структурного перетворення.

Перед початком кожної серії дослідів здійснювалась підготовка експериментальних зразків живильного розчину, які використовуються у гідропонних системах. Склад та концентрації компонентів у розчинах відповідали нормативним вимогам, регламентованим ДСТУ 7887:2015 «Зрошення. Строки та норми поливу сільськогосподарських культур за краплинного зрошення. Методи визначення», що дозволило забезпечити стандартизованість умов дослідження та відтворюваність результатів. Підготовка зразків включала контроль складу вихідної води, внесення мінеральних добрив, їх повне розчинення, а також контроль за температурним режимом перед подачею на оброблення [51].

Час дії гідродинамічного навантаження на середовище варіювався в широкому діапазоні від 1 до 300 секунд. Такий діапазон дозволив встановити динаміку змін у структурі середовища, виявити критичні часові межі ефективного впливу, а також дослідити вплив тривалості пульсаційної обробки на показники масообміну.

Під час оброблення варіювалися ключові технологічні параметри, які безпосередньо впливають на інтенсивність процесів у робочій камері апарата. До них належали:

- час оброблення, який визначав тривалість дії зсувних сил і турбулентних потоків на досліджуване середовище;
- температура живильного розчину, що впливала на в'язкість рідини та швидкість хімічних і біохімічних реакцій;
- швидкість обертання ротора, яка корелює з лінійною швидкістю та кутовою швидкістю, що формують пульсаційне поле в реакторі;
- витрата середовища, яка дозволяла оцінити ефективність оброблення у динамічному потоці з точки зору його гомогенності та повного об'єму циркуляції.

Для забезпечення достовірності та статистичної обґрунтованості результати кожного експерименту дублювалися щонайменше тричі.

Загалом, методика експериментального дослідження була спрямована на виявлення закономірностей впливу гідродинамічного оброблення на властивості живильних середовищ, із подальшим моделюванням та оптимізацією процесу для практичного впровадження в гідропонні системи з метою підвищення їх ефективності.

2.3 Методи експериментальних досліджень

В роботі під час проведення експериментального дослідження використано методи аналітичної хімії (потенціометрія), мікроскопії, хімічні методи.

2.3.1 Методи аналітичної хімії (потенціометрія)

У ході експериментальних досліджень для визначення фізико-хімічних параметрів живильних середовищ гідропонних систем застосовувався метод потенціометрії – один із найпоширеніших і точних інструментальних методів аналітичної хімії. Потенціометрія ґрунтується на вимірюванні електродного потенціалу електродної системи без відбору струму, що дозволяє точно визначити концентрації іонів у розчинах, а також здійснювати контроль за змінами кислотно-лужного балансу (рН), редокс-потенціалу (ОВП) тощо.

Сутність потенціометричного методу полягає у вимірюванні напруги на електродах при відсутності струму в електрохімічному осередку. В основі потенціометрії, як вже було зазначено, лежить рівняння Нернста (2.1):

$$E_{eq} = E^0 + \frac{RT}{zF} \ln \frac{a_{ox}}{a_{red}} \quad (2.1)$$

де E_{eq} - рівноважний електродний потенціал (В),

E^0 - стандартний електродний потенціал,

R - газова стала ($8,314 \text{ Дж} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{моль}^{-1}$),
 F - постійна Фарадея ($96485 \text{ Кл} \cdot \text{моль}^{-1}$),
 z - число переданих електронів,
 T - температура (в К).

Широкі можливості для застосування методів потенціометрії для вивчення різних систем забезпечуються варіюванням використовуваних електродів, що дозволяє підбирати системи селективні по відношенню до певних іонів.

Виділяють чотири основних напрямки розвитку потенціометрії: редоксометрія, іонометрія, визначення термодинамічних величин і потенціометричні титрування. Інший варіант класифікації дозволяє розглядати два основні підходи, до розгляду зв'язку аналітичного сигналу з об'єктом аналізу. У першому випадку аналітичний сигнал розглядають як функцію активності визначення компонента. Такий підхід називають прямою потенціометрією. Другий підхід, також званий непрямим титруванням, отримав назву потенціометричні титрування. Він надає визначення потенціалу як функції обсягу введеного реагенту, як правило даний метод використовується для визначення кінцевої точки титрування [52, с. 123].

У межах дослідження методом потенціометрії проводили такі вимірювання:

- Визначення рН середовища, що дозволяло оцінити ступінь кислотності або лужності розчину до і після оброблення в роторно-пульсаційному апараті. Значення рН є критично важливим для засвоюваності макро- та мікроелементів рослинами.
- Вимірювання окисно-відновного потенціалу (ОВП), який дає уявлення про окиснювальні або відновні властивості середовища. Це особливо важливо для стабільності хімічних форм мікроелементів та можливих біохімічних реакцій у розчині.

Для проведення потенціометричних вимірювань використовувалася цифрова рН-метрична система з комбінованим електродом. Перед початком

кожної серії вимірювань електрод калібрували буферними розчинами з відомими значеннями рН (4,00; 7,00; 9,18), що гарантувало точність результатів.

Температурна компенсація здійснювалася автоматично, що дозволяло зменшити похибку вимірювань, пов'язану зі змінами температури розчину. Після кожного експерименту зразки аналізували відразу, щоб уникнути змін складу внаслідок атмосферного впливу або мікробіологічних процесів.

Метод потенціометрії, завдяки своїй чутливості, швидкості аналізу та можливості безперервного моніторингу параметрів, дозволив отримати точну та достовірну інформацію про динаміку змін у складі живильного середовища під впливом гідродинамічного оброблення. Отримані дані стали основою для побудови аналітичних залежностей і моделювання процесів масообміну в гідропонних умовах.

2.3.2 Методи мікроскопії

У структурі експериментального дослідження методи мікроскопії застосовувалися для візуалізації та якісно-кількісного аналізу структурних змін у живильному середовищі до та після гідродинамічного оброблення в роторно-пульсаційному апараті. Основна увага приділялася вивченню таких аспектів, як агрегатний стан, розмір і морфологія частинок у суспензії, наявність колоїдних утворень, осадів, а також мікробіологічна чистота середовища.

Мікроскопія – це вивчення об'єктів за допомогою мікроскопа. Причому різними методами. Кожен з них підходить для дослідження певних видів зразків і не може використовуватися для вивчення відразу всіх мікроструктур.

Методи дослідження мікроразків можна розділити на світлові й електронні. Вони, в свою чергу, поділяються на підметоди.

Світлова мікроскопія використовує такі методи: світлого поля, темного поля, фазового контрасту, інтерференційного контрасту, поляризаційну мікроскопію, метод дослідження в світлі люмінесценції, метод спостереження

в інфрачервоних або ультрафіолетових променях. Окремо можна виділити мікрофотографування і мікрокінозйомку.

До електронних методів відносять просвічувальну (трансмісійну) і сканувальну (растрову) мікроскопію.

Метод світлого поля – найбільш широко застосовуваний. При використанні світла, що проходить він дозволяє вивчати різні прозорі зразки, наприклад тонкі тінні мінералів, пофарбовані зрізи тканин тварин і рослин. Іноді для вивчення таких зразків застосовується косе освітлення - воно дає більш рельєфне зображення. Метод світлого поля у відбитому світлі потрібен для дослідження непрозорих матеріалів, наприклад металів і руд.

Метод темного поля використовують для вивчення живих нефарбованих клітин, які не можна побачити при світловому методі вивчення (мікроскопії). Він вимагає застосування спеціальних мікроскопів, на які встановлені конденсори особливої конструкції.

Мікроскопія в поляризаційному світлі – це можливість вивчати мінерали, сплави та багато іншого. Даний метод найчастіше використовується для дослідження кристалічних структур, так як він дозволяє реєструвати подвійне заломлення променів світла, що неможливо спостерігати звичайним способом. У поляризаційному мікроскопії теж використовуються особливі мікроскопи – поляризаційні [53, с. 234].

До сучасних методів мікроскопії відноситься і метод фазового контрасту. Він потрібен для спостереження прозорих і безбарвних об'єктів, в тому числі і живих. У фазово-контрастній мікроскопії застосовуються спеціальні мікроскопи, які дозволяють реєструвати фазові зміни світлової хвилі в момент її проходження через різні структури розглянутого зразка.

Флуоресцентна (люмінесцентна) мікроскопія заснована на отриманні зображення зразка шляхом приведення його атомів і молекул в збуджений стан. Зразок опромінюється високочастотним світлом, що призводить до вивільнення випромінювання, яке пропускається через фільтр і

спостерігається в оптичному діапазоні. Для спостережень використовуються спеціальні флуоресцентні мікроскопи.

Дослідження проводилося за допомогою світлової оптичної мікроскопії із застосуванням мікроскопа зі збільшенням до 1000×, оснащеного цифровою камерою для фіксації зображень та програмного забезпечення для морфометричного аналізу. У випадках потреби в деталізації поверхневих структур застосовувалася також фазово-контрастна мікроскопія, що дозволяє досліджувати прозорі об'єкти без попереднього фарбування.

Зразки для мікроскопічного аналізу готувалися шляхом нанесення краплі живильного розчину на предметне скло з подальшим прикриттям покривним склом. У разі потреби здійснювалося попереднє центрифугування з метою концентрування дисперсної фази або осаду. Для виявлення мікроорганізмів у живильному середовищі використовувалися методики забарвлення (наприклад, метиленовим синім) відповідно до мікробіологічних стандартів.

Порівняння зразків до і після оброблення дозволяло встановити вплив параметрів гідродинамічного режиму (частоти коливань, швидкості зсуву, температури) на ступінь деструкції агрегатів, зменшення розміру частинок, а також зменшення мікробного забруднення. У багатьох випадках було зафіксовано зниження ступеня агрегації мікрочастинок, що свідчить про стабілізацію колоїдної системи після оброблення.

Таким чином, методи мікроскопії виконали важливу функцію на етапі емпіричної перевірки ефективності впливу гідродинамічної обробки на фізичну стабільність та мікробіологічну чистоту живильних середовищ, а також забезпечили якісне підтвердження результатів, отриманих іншими методами аналізу (зокрема, потенціометрією та математичним моделюванням).

2.3.3 Хімічні методи

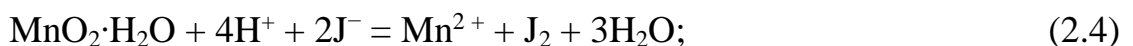
Хімічні методи дослідження застосовувались з метою кількісного та якісного визначення основних фізико-хімічних характеристик живильних середовищ до та після гідродинамічного оброблення. Дані методи дозволили дослідити зміни у складі, концентрації макро- та мікроелементів, а також у загальному іонному складі розчину, що мають безпосередній вплив на ефективність живлення кореневої системи рослин у гідропоніці.

Хімічні методи проведення експериментальних досліджень в свою чергу можна розділити на якісний (метод Вінклера) та кількісний аналізи живильного середовища. Серед методів визначення концентрації розчиненого кисню найстарішим, але до сих пір не втративши своєї актуальності, залишається хімічний метод Вінклера [53, с. 2843]. У цьому методі розчинений кисень кількісно реагує зі свіжоосадженим гідроокисом Mn (II). При підкисленні, з'єднання марганцю більш високої валентності вивільняє йод з розчину йодиду в еквівалентних кисню кількостях. Йод, що виділився далі визначається титруванням тіосульфатом натрію з крохмалем, як індикатор.

Стадія фіксації кисню (лужне середовище):



Йодометричне титрування (кисле середовище):



Пробу живильного розчину для гідропонних систем відбирають у мірну колбу, наповнюючи до самого верху, вводять, опускаючи до дна, 1–2 см³ розчину солі мангану (II) з концентрацією 0,1 г–екв/дм³, потім додають 1–2 см³ 15%–го лужного розчину KI на незначну глибину, закривають пробкою, щоб не було бульбашок повітря, і перевертають кілька разів колбу для перемішування розчину. Малорозчинний MnO(OH)₂ осаджується. Через 10–15

хвилин у склянку обережно додаються 10 см^3 $9 \text{ N H}_2\text{SO}_4$. Закривають пробкою і перемішують.

Вміст колби переносять у конічну колбу, і титрують йод, що виділився, розчином тіосульфату натрію з концентрацією $0,1 \text{ г-екв/дм}^3$ з додаванням в якості індикатора 1 см^3 $0,2\%$ розчину крохмалю до зникнення забарвлення.

Масову концентрацію розчиненого кисню C обчислюють за формулою:

$$C = \frac{V \cdot C \cdot M \cdot 1000}{V_1 - V_2}, \text{ мг O}_2/\text{дм}^3 \quad (2.7)$$

де V – об'єм розчину тіосульфату натрію, витраченого на титрування, см^3 ;

C – нормальна концентрація розчину тіосульфату натрію;

M – молярна маса еквівалента кисню (8);

V_1 – місткість кисневої склянки, см^3 ;

V_2 – об'єм реагентів, доданих у кисневу склянку для фіксації кисню, см^3 .

Визначенню кисню перешкоджають окисники, що реагують з КІ (хлор, нітрити, залізо (III) та ін.) відновники котрі взаємодіють з виділеним йодом (сульфіти, тіосульфати, деякі органічні сполуки). Сполуки двовалентного заліза на стадії фіксації кисню можуть виступати як конкуренти по відношенню до марганцю.

Відомо, що нітрити в кислому середовищі здатні окислювати йодид іони, викликаючи тим самим завищень результатів у методі Вінклера. Вплив органічних речовин, як виражених відновників буде проявлятися на всіх етапах визначення розчиненого кисню. Вміст в аналізованій воді сульфідів приводить до заниження результатів методу Вінклера. При цьому взаємодія сульфідів з окислювачами носить стехіометричний характер (1 моль кисню і 2 моля сульфідів). У результаті реакції виділяється елементарна сірка.

Процес окислення йодиду киснем пришвидшується із зростанням кислотності. Зменшити вплив цього процесу можна, регулюючи рН

середовища. Рекомендоване значення кислотності складає $pH = 2-2.5$. Збільшувати pH більше 2.7 не рекомендується, тому що відбудеться гідратування марганцю. Одночасно з окисненням йодиду проходить процес його випаровування. Утворення комплексної частки I_3^- в умовах надлишку йодиду дозволить зв'язати практично весь молекулярний йод у розчині.

Кількісний аналіз живильного розчину передбачає використання тестових систем, які дають можливість визначити кількість різних компонентів, які містяться в гідропонному біологічному середовищі (солі, залізо та ін.).

Тест-методи в багатьох випадках використовують для попередньої оцінки наявності та вмісту компонентів. В цьому випадку доречна методологія скринінгу. Дуже зручні тест-системи для оцінки узагальнених показників досліджуваного об'єкта, наприклад хімічного споживання кисню (ХПК) або суми важких металів у живильному середовищі.

Хімія тест-методів заснована на кольорових реакціях, наприклад реакціях комплексоутворення або окислення-відновлення. «Ноу-хау» розробників і виробників тест-систем означає: підбір раціональної комбінації реагентів, стабілізацію сумішей реагентів і розчинів, зменшення шкідливих впливів шляхом додавання маскуючих агентів. Головна мета – розробити тест, який був би експресним і легким в здійсненні. Крім реакцій, що призводять до появи забарвлення, використовують також хімічні взаємодії, результатом яких є люмінесценція. Ефект вимірюють не тільки візуально, але й за допомогою простих у використанні портативних (зазвичай кишенькового типу) приладів. Особливо часто вимірюють пропускання світла, дифузне відбиття або, як уже сказано, люмінесценцію.

Значну роль в тест-методах відіграють каталітичні реакції, переважно з використанням ферментів. Відповідно використовуються реагенти різної природи і різного механізму дії.

Для контролю якості розчинів та перевірки стабільності хімічного складу також використовувалися методи гравіметрії, коли необхідно було визначити масову концентрацію певних речовин після випаровування або фільтрування.

Значна частина досліджень проводилась відповідно до чинних державних стандартів (зокрема, ДСТУ 7688:2015 та ДСТУ ISO 9964), що регламентують методи аналітичного контролю якості води і водних розчинів у сільському господарстві. Також брались до уваги нормативи щодо допустимих концентрацій хімічних елементів для живлення сільськогосподарських культур у закритому ґрунті.

Таким чином, хімічні методи стали важливою складовою загальної методології дослідження – вони надали об'єктивну інформацію про склад і властивості живильного середовища, а також дозволили відстежити хімічні ефекти, зумовлені гідродинамічним впливом.

2.4 Модельні середовища

В роботі використані живильні середовища на прикладі гідропонних систем, а саме гідропонне середовище після вирощування салату-латуку (лат. *Lactuca sativa*), огірок звичайний (лат. *Cucumis sativus*), ірис гібридний (лат. *Iris sibirica*), самшит звичайний (лат. *Buxus*), гортензія (лат. *Hydrangea*), кабачок (лат. *Cucurbita pepo subsp. pepo*), живильні розчини загального призначення (універсальні).

Всі модельні середовища було використано та досліджено при нормальних умовах навколишнього середовища: температура навколишнього повітря – $+20^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$; відносна вологість повітря при температурі 20°C – $65\pm 15\%$; атмосферний тиск – 100 ± 4 кПа (750 ± 30 мм рт. ст.).

2.5 Основне вимірювальне обладнання та прилади

Для дослідження було використано мікроскоп біологічний бінокулярний Ломо Біолам Р-15, який призначений для дослідження препаратів в світлі в світлому полі. Технічні характеристики мікроскопу подано в табл. 2.2.

Таблиця 2.2

Технічні характеристики мікроскопу Ломо Біолам Р-15

| Характеристика | Показники |
|-------------------------|---|
| Об'єктиви (Збільшення): | 8x0,20 40x0,65 90x1,25 (масляна імерсія) |
| Окуляри: | К7 К10 |
| Освітлювач: | дзеркало |
| Насадка: | бінокулярна |
| Маса мікроскопа, кг | 4,6 |
| Габарити мікроскопа | 230x180x360 мм |
| Столик | Прямокутний з координатним переміщенням препарату |

Джерело: [55]

Також було використано науково-дослідний мікроскоп Axio Imager 10 (фірми Zeiss), який призначений для широкого спектру досліджень в клітинній біології, неврології, молекулярній генетиці та патанатомії, з можливістю проведення не тільки простих спостережень, але й реалізації складних експериментальних завдань.

Особливості Axio Imager 10:

- методи дослідження: світле поле, темне поле, фазовий контраст, поляризаційний контраст, флуоресценція, диференційно-інтерференційний контраст (контраст Номарського);
- шість різних штативів (ручних або моторизованих) на вибір;
- оптика надвисокої роздільної здатності і контрасту;
- моторизовані системи з інтелектуальними керуючими модулями;
- система автоматичного розпізнавання компонентів;

- можливість збереження і подальшого відновлення поточних налаштувань;

- можливість об'єднання з системами отримання флуоресцентних зображень або лазерним скануючим мікроскопом.

Технічні характеристики науково-дослідного мікроскопу Axio Imager 10 представлено в табл. 2.3.

Таблиця 2.3

Технічні характеристики мікроскопу Axio Imager 10

| Характеристика | Показники |
|--------------------------------|--|
| Джерело світла, що проходить | галогенні лампи або світлодіод |
| Джерело для флуоресценції | ртутна газорозрядна лампа, металгалідна лампа, ксенонова лампа, світлодіодна система Colibri 2 |
| Освітлення | налаштування за Кьолером |
| Управління координатним столом | ручне з правого або лівого боку штатива, моторизоване |
| Револьвер об'єктивів | 6 або 7-й позиційний |
| Об'єктиви | 1,25x, 2,5x, 5x, 10x, 20x, 40x, 50x, 63x, 100x, 150x |
| Окуляри | 10x / 23 мм, 10x / 25 мм |

Джерело: [56]

Для вимірювання значень рН, окислювально-відновного потенціалу і температури в гідропонних розчинах було використано рН-метр-мілівольтметр рН-150М, який поєднує гарні метрологічні характеристики, зручність, простоту, надійність і невисоку вартість. Технічні показники рН-метр-мілівольтметр рН-150М представлено в табл. 2.4.

Таблиця 2.4

Технічні характеристики рН-150М

| Вимірювані показники | Діапазон вимірів | Дискретність | Межі основної абсолютної похибки | |
|--|------------------|--------------|----------------------------------|---------|
| | | | перетворювача | приладу |
| Активність іонів водню, рН | -1 - +14 | 0,01 | ± 0,02 | ± 0,05 |
| Окислювально-відновний потенціал, мВ | -1999 - +1999 | 1 | ± 3 | - |
| Температура аналізованого середовища, °С | -10 - +100 | 1 | ± 2 | ± 2 |

Продовження табл. 2.4

| | |
|--|------------|
| Діапазон автоматичної термокомпенсації, °С | -10 - +100 |
| Живлення від мережі змінного струму напругою, В | 220 ± 22 |
| частотою, Гц | 50 ± 0,5 |
| або автономне від чотирьох вбудованих елементів типу "316", В | 6,0 |
| Потужність споживана від мережі, В.А, не більше | 8,0 |
| Тривалість безперервної роботи від автономного джерела, год. на добу | 4,0 |
| Габаритні розміри перетворювача, мм | 240x110x75 |
| Маса перетворювача, кг | 0,8 |

Джерело: [57]

Портативний оксиметр PDO-408 з вбудованим мікропроцесором, призначений для вимірювання DO, O₂.

Кисень необхідний більшості живих істот на Землі для процесу синтезу енергії в організмі (виняток становлять анаеробні організми). Знижена концентрація кисню також може вказувати на те, що в воді активно протікають гнильні процеси.

Концентрація вільного кисню в воді сильно залежить від її температури (при підвищенні температури концентрація кисню зменшується).

Особливості оксиметра PDO-408:

— мікропроцесорний прилад для швидких і точних вимірювань;

- великий РК-дисплей для візуалізації результатів вимірювань концентрації розчиненого кисню і температури одночасно;
- автоматична компенсація температури, ручна компенсація солоності (MSC) і висоти над рівнем моря (MAC);
- перемикання одиниць вимірювань: °C, °F;
- функції максимального, мінімального значення, утримання значення, пам'ять на 150 точок при вимірюванні;
- індикація низького заряду батареї, автоматичне відключення через 10 хв без використання.

Технічні характеристики оксиметра Ezodo PDO-408 подано в табл. 2.5.

Таблиця 2.5

Технічні характеристики оксиметра Ezodo PDO-408

| Характеристичні дані | Показники |
|--------------------------------------|---|
| Діапазон вимірів | 0 - 20 ppm (мг/л) для DO 0 - 200% для O ₂ 0 - 150°C для температури |
| Роздільна здатність приладу | 0,01 ppm (мг/л) для DO 0,1% для O ₂ 0,1 °C для температури |
| Похибка вимірювання | ± 0,2 +1 для DO ± 2% FS для O ₂ ± 0,2 °C + 1 поділок для температури |
| Автоматична температурна компенсація | 0 ... 50 °C |
| Компенсація солемісту води | 0 ... 50 ppm |
| Компенсація висоти над рівнем моря | 0 ... 6960 м |
| Пам'ять | є (150 вимірювань) |
| Габаритні розміри | 96x120x46 мм |
| Вага (з батареєю) | н / д |
| Елементи живлення | 1 шт. (Тип "Крона") / мережа 220В |
| Тип датчика | змінний |
| Виробник | Тайвань |
| Гарантія | 1 рік |

Джерело: [58]

Розчинений у воді кисень знаходиться у вигляді гідратованих молекул O_2 . Вміст розчиненого кисню залежить від температури, атмосферного тиску, ступеня турбулізації води, кількості опадів, мінералізації води та ін. При кожному значенні температури існує рівноважна концентрація кисню, яку можна визначити за спеціальними довідковими таблицями, складеними для нормального атмосферного тиску. Ступінь насичення води киснем, відповідна рівноважної концентрації, приймається рівною 100%. Розчинність кисню зростає зі зменшенням температури і мінералізації і зі збільшенням атмосферного тиску.

Розчинений кисень є дуже нестійким компонентом хімічного складу вод. При його визначенні особливо ретельно слід проводити відбір проб: необхідно уникати контакту води з повітрям до фіксації кисню (зв'язування його в нерозчинний зв'язок).

Контроль вмісту кисню в воді - надзвичайно важлива проблема, у вирішенні якої зацікавлені практично всі галузі народного господарства, включаючи чорну та кольорову металургію, хімічну промисловість, сільське господарство, медицину, біологію, рибну та харчову промисловість, служби охорони навколишнього середовища.

Для визначення біологічного складу гідропонного розчину використано метод ідентифікації. При використанні різного збільшення можна ідентифікувати різні мікроорганізми, які наявні в розчинах гідропонних систем. Для підрахунку кількості клітин в заданому об'ємі рідини було використано камеру Горяєва.

Камера Горяєва являє собою прозорий паралелепіпед (предметне скло) з борознами і нанесеною мікроскопічної сіткою (рис. 2.2). Розміри малих розподілів клітин сітки становлять 0,05 мм, а великих – 0,2 мм. При цьому сітка нанесена на ділянку скла, розташовану на 0,1 мм нижче, ніж дві сусідні ділянки, які ділянки слугують для притирання покривного скла. Як результат, обсяг рідини над квадратом, утвореним великими поділками сітки Горяєва, становить 0,004 мікролітра.

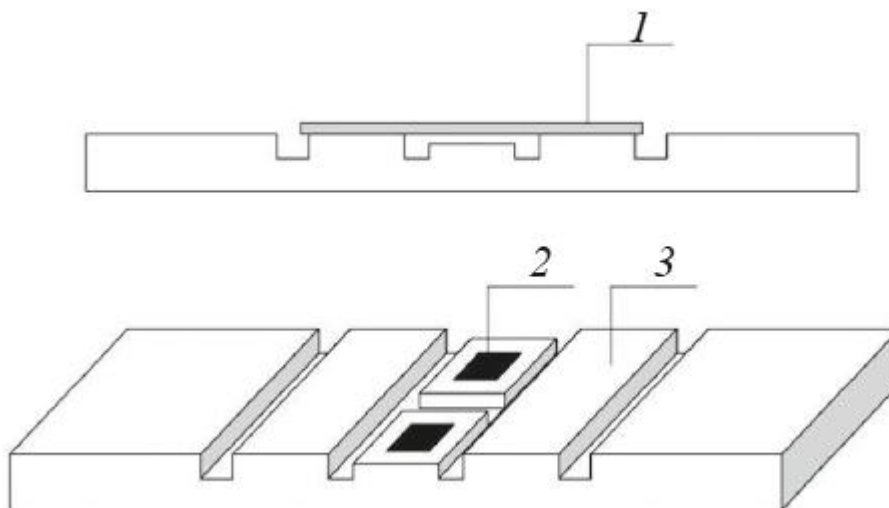


Рис. 2.2. Камера Горяєва: 1 – покривне скло; 2 – мікроскопічна сітка; 3 – місце для протирання скла

Джерело: [58]

Сітка камери Горяєва поділена на 225 великих квадратів (15 рядків по 15 квадратів у рядку). Площа великого квадрата дорівнює $1/25 \text{ мм}^2$ і поділена на 16 малих квадратів. Сторона малого квадрата – $1/20 \text{ мм}$, площа – $1/400 \text{ мм}^2$, об'єм при глибині $1/10 \text{ мм}$ – $1/4000 \text{ мм}^3$. Частина великих квадратів розграфлена вертикально, горизонтально або не розграфлена.

2.6 Обрахунок похибки вимірювання

Для оцінювання надійності та достовірності експериментальних результатів, отриманих у ході дослідження, було здійснено обрахунок похибки вимірювання із застосуванням критерію Кохрена. Даний статистичний критерій доцільно використовувати у випадках, коли необхідно порівняти три і більше вибірки однакового обсягу з метою перевірки однорідності дисперсій [59, с. 134].

У контексті виконаного експерименту перевірка за критерієм Кохрена дозволила встановити, чи є допустимою розбіжність результатів між паралельними серіями вимірювань фізико-хімічних параметрів (зокрема рівня

pH, електропровідності, температури) розчинів до і після роторно-пульсаційної обробки.

Критерій Кохрена обчислюється за формулою:

$$G = \frac{S_{max}^2}{\sum_{i=1}^k S_i^2} \quad (2.8)$$

де:

S_{max}^2 — максимальна дисперсія серед усіх вибірок;

S_i^2 — дисперсія і-тої вибірки;

k — кількість вибірок.

Розраховане значення G порівнюється з критичним значенням ($G_{кр}$), яке береться з таблиць Кохрена для відповідного рівня значущості (зазвичай $\alpha=0,05$) та кількості ступенів свободи.

Якщо $G < G_{кр}$ – дисперсії однорідні, можна довіряти середнім значенням.

Якщо $G > G_{кр}$ – можливо, є аномальні дані або помилки, і одне з вимірювань сильно «випадає».

У межах експерименту обробка статистичних даних та обрахунок критерію проводилися для кожної серії з не менше ніж трьох паралельних вимірювань. Результати аналізу свідчать про відсутність грубих похибок та про задовільну повторюваність вимірювань, що дозволяє використовувати середні значення параметрів як репрезентативні для подальших узагальнень та моделювання.

Висновки за розділом

Сформовано комплексне експериментальне обґрунтування доцільності та ефективності використання гідродинамічного оброблення гідропонних живильних середовищ за допомогою дискретно-імпульсного введення енергії. Розроблено та апробовано лабораторну установку замкненого циркуляційного типу, конструкція якої дозволила моделювати умови функціонування промислових гідропонних систем із можливістю варіювання частоти й

інтенсивності імпульсних навантажень. Установка була обладнана роторно-пульсаційним апаратом циліндричного типу, системою стабілізації потоку, блоком контролю параметрів і автоматизованими датчиками для безперервного моніторингу фізико-хімічних характеристик середовища.

Розроблені методики проведення досліджень забезпечили високу відтворюваність і точність вимірювань у різних режимах оброблення. Використання методів потенціометрії дозволило визначити динаміку змін рН та окисно-відновного потенціалу у реальному часі, що стало основою для кількісного аналізу активізації середовища. Методи аналітичної хімії, зокрема потенціометрія та титриметрія, у поєднанні з методами мікроскопії забезпечили можливість оцінити не лише макропараметри середовища, але й структурні зміни у біоплівках та осадах, що утворювались на стінках циркуляційної системи. Хімічні методи аналізу дали змогу кількісно оцінити вміст ключових макроелементів (азоту, фосфору, калію) та побічних метаболітів (ацетальдегід, леткі органічні кислоти), а також простежити зміни їх концентрацій під впливом імпульсного оброблення.

У рамках роботи були сформовані модельні середовища, склад яких відповідав типовим гідропонним живильним розчинам для салатних культур і зелені, що дозволило уніфікувати умови дослідів та забезпечити можливість подальшого порівняння результатів із даними промислової апробації.

Для контролю точності експериментальних даних проведено розрахунок похибки вимірювань із використанням критерію Кохрена, що дозволило підтвердити статистичну однорідність серій дослідів: відносна похибка вимірювань для ключових параметрів (рН, ОВП, концентрації розчиненого кисню, макроелементів) не перевищувала 3–5 %, що є допустимим для експериментів у рідинних системах.

Таким чином, отримані дані можуть бути використані для подальшого математичного моделювання масообмінних процесів і обґрунтування технологічних режимів промислового впровадження.

РОЗДІЛ 3

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ГІДРОДИНАМІЧНОГО ОБРОБЛЕННЯ ГІДРОПОННИХ ЖИВИЛЬНИХ СЕРЕДОВИЩ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ МЕТОДУ ДИСКРЕТНО-ІМПУЛЬСНОГО ВВЕДЕННЯ ЕНЕРГІЇ

3.1. Обґрунтування вибору математичної моделі гідродинамічного оброблення

Обґрунтування вибору математичної моделі гідродинамічного оброблення у контексті дослідження інтенсифікації масообміну в живильних середовищах гідропонних систем ґрунтується на необхідності адекватного опису складних нестационарних процесів, що відбуваються під впливом зовнішніх імпульсних енергетичних впливів. Особливістю гідропонного середовища є його високочутливість до змін у структурі потоку, температурних градієнтах та концентраційних профілях, а також наявність як макро-, так і мікроскопічних зон масообміну, що потребують точного моделювання.

У зв'язку з цим розроблена математична модель враховує вплив змінного тиску, кавітаційні явища, гідродинамічну нестабільність, в'язкість середовища, а також геометричні характеристики гідропонної установки. Під дією дискретно-імпульсного введення енергії або ультразвукових хвиль у рідині виникають нестационарні збурення, які спричиняють утворення вортексів, мікроструменів та імпульсних зон розрідження та стиснення. Традиційні моделі ламінарного або турбулентного потоку є недостатніми для опису таких явищ, а отже, необхідним є застосування моделей нестационарної гідродинаміки з числовою реалізацією методом скінченних об'ємів або елементів.

Зокрема, доцільним є використання модифікованих рівнянь Нав'є-Стокса, доповнених членами, що описують дію імпульсного джерела тиску, кавітаційних мікроструктур і локальних змін густини та в'язкості. Такі моделі

дозволяють враховувати не тільки розподіл швидкостей у середовищі, але й формування зон турбулізації, які безпосередньо впливають на коефіцієнт теплопередачі. Для подальшої адаптації моделей до умов гідропонної установки застосовано спрощення до квазидвовимірних або осесиметричних систем, що знижує обчислювальну складність без втрати точності опису ключових процесів [60, с. 354].

Крім того, особливу увагу слід приділити граничним умовам: модель повинна враховувати специфіку конструкції гідропонного резервуару, геометрію подачі імпульсу, рухливість рідини у прикордонних зонах та умови відбивання хвиль. Обов'язковим є також включення до моделі теплообміну через конвекцію та провідність, що забезпечить адекватне відображення процесу тепломасообміну в об'ємі середовища.

Таким чином, вибір математичної моделі ґрунтується на прагненні до балансу між точністю фізичного опису явищ та обчислювальною ефективністю. Модель відображає вплив імпульсного оброблення на структуру потоку, параметри середовища та тепломасообмінні характеристики, що уможлиблює її подальше використання для оптимізації режимів роботи гідропонних систем і розрахунку енергоефективних технологічних параметрів.

3.2 Математичне моделювання процесу гідродинамічного оброблення

Для адекватного опису процесу гідродинамічного оброблення живильних розчинів у гідропонних системах була використана комплексна модель, що базується на рівняннях Нав'є–Стокса з урахуванням рівняння неперервності та додаткових членів, які враховують вплив пористого середовища. Оскільки живильний розчин у даному випадку рухається крізь субстрат із певною проникністю, до системи рівнянь було введено складову Брінкмана для врахування граничних умов на твердих поверхнях, а також модифікацію рівняння Дарсі для опису лінійного гідродинамічного опору.

Крім того, використано нелінійний закон опору, що відображає характерний для пористих структур вплив швидкості потоку на втрати тиску.

Математичне моделювання процесів гідродинамічного оброблення живильних середовищ потребує адекватного опису як руху рідини у вільних каналах, так і поведінки потоку у пористих структурах, що характерні для гідропонних систем. Особливість досліджуваного процесу полягає у використанні дискретно-імпульсного введення енергії, що зумовлює наявність різких коливань тиску і швидкості та створює локальні градієнти параметрів. Тому модель повинна поєднувати базові положення класичної гідродинаміки з модифікаціями для врахування пористості та імпульсної дії.

$$\left\{ \begin{array}{l} u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + Jv_f \nabla^2 u - v_f \frac{\varphi}{K} u - \varphi^2 \frac{c_F}{\sqrt{K}} |V| u \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0. \end{array} \right.$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \quad \text{– інерційні члени}$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \quad \text{– сили тиску}$$

$Jv_f \nabla^2 u$ – складова Брінкмана для врахування граничних умов на твердих поверхнях

$$v_f \frac{\varphi}{K} u \quad \text{– врахування лінійного закону гідродинамічного опору (Дарсі)}$$

в пористих середовищах

$$\varphi^2 \frac{c_F}{\sqrt{K}} |V| u \quad \text{– нелінійний закон гідродинамічного опору}$$

$$\text{Re}_K = \frac{\vec{V}\sqrt{K}}{\nu} \quad \text{число Рейнольдса відносної проникності } K$$

$$\nabla P = -\frac{\mu}{K} u_z - c_F K^{-1/2} \rho |u_z| u_z + \tilde{\mu} \nabla^2 u_z \quad \text{– гідравлічний опір}$$

$\tilde{\mu}$ – коефіцієнт ефективної в'язкості пористого середовища

У вільному об'ємі основою для опису руху є рівняння Нав'є–Стокса у нестационарній формі:

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{f}_{\text{imp}},$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0,$$

де \mathbf{u} – вектор швидкості, p – тиск, ρ – густина рідини, μ – динамічна в'язкість, а \mathbf{f}_{imp} – додаткова сила, що відтворює дію імпульсного введення енергії. У цьому записі перший доданок у дужках описує інерційні члени, другий відповідає силам тиску, третій – силам в'язкості, а додатковий член дозволяє врахувати періодичні енергетичні імпульси, характерні для методу ДІВЕ.

У пористих середовищах структура потоку істотно ускладнюється, тому класичні рівняння доповнюються складовими Брінкмана–Дарсі–Форхаймера:

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \frac{1}{\varepsilon} \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right) = -\nabla p + \mu_{\text{eff}} \nabla^2 \mathbf{u} - \frac{\mu}{k} \mathbf{u} - \beta \frac{\rho}{\sqrt{k}} |\mathbf{u}| \mathbf{u},$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0,$$

де ε – пористість, k – коефіцієнт проникності, μ_{eff} – ефективна в'язкість пористого середовища, β – емпіричний коефіцієнт інерційного опору. Тут складова Брінкмана враховує вплив граничних умов і зсувних напружень у пористих шарах, член Дарсі описує лінійний закон гідродинамічного опору, а форхаймерів доданок відтворює нелінійний опір, що проявляється при зростанні швидкостей потоку.

Для узагальнення аналізу модель зручно перевести у безрозмірну форму. Класичне число Рейнольдса визначає співвідношення інерційних та в'язких сил у вільному потоці:

$$Re = \frac{\rho UL}{\mu}$$

Для пористих середовищ важливим є «число Рейнольдса проникності»:

$$Re_k = \frac{\rho U \sqrt{k}}{\mu},$$

яке показує, чи достатньо враховувати лише лінійний закон Дарсі (при $Re_k < 1$), чи необхідно додавати нелінійний опір Форхаймера (при $Re_k > 1$). Додатковим критерієм виступає число Дарсі, що відображає ступінь проникності середовища відносно його геометричних розмірів:

$$Da = \frac{k}{L^2},$$

Таким чином, вибір саме цієї математичної моделі обґрунтовується її здатністю описати як макроскопічні характеристики руху у вільному об'ємі, так і локальні ефекти взаємодії потоку з пористим середовищем. Вона враховує інерційність, сили тиску, в'язкі ефекти, гідравлічний опір та імпульсне навантаження, забезпечуючи комплексне відтворення фізичної картини процесу гідродинамічного оброблення. Завдяки цьому модель придатна не лише для теоретичного аналізу, але й для практичних прогнозів параметрів у гідропонних системах із замкненим циклом рециркуляції.

Процес гідродинамічного оброблення розглядається як нестационарна течія ньютонівської, слабкостисливої (у робочому діапазоні — практично нестисливої) рідини в двох підобластях: у вільному потоці апарата та в пористій області, що моделює кореневу зону/наповнювач або модулі рециркуляції.

Було обраховано проникність різних середовищ за виразом:

$$K = \frac{d^2 \varphi^3}{180(1 - \varphi^2)}$$

Для обчислення використовувались значення об'ємної пористості інертних носіїв в діапазоні $\varphi = 0,25 \dots 0,5$. Дані подано в табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Розрахункове значення проникності

| № п/п | Розмір, $d_p \cdot 10^{-3} \text{ м}$ | Проникність, $K, \cdot 10^{-11} \text{ м}^2$ | φ |
|-------|---------------------------------------|--|-----------|
| 1 | 1 | 9,97 | 0,256 |
| 2 | 5 | 249 | 0,256 |
| 3 | 10 | 997 | 0,256 |
| 4 | 15 | 2240 | 0,256 |
| 5 | 20 | 3990 | 0,256 |
| 6 | 1 | 22,40 | 0,33 |
| 7 | 5 | 560 | 0,33 |
| 8 | 10 | 2400 | 0,33 |
| 9 | 15 | 5040 | 0,33 |
| 10 | 20 | 8960 | 0,33 |
| 11 | 1 | 42,30 | 0,4 |
| 12 | 5 | 1060 | 0,4 |
| 13 | 10 | 4230 | 0,4 |
| 14 | 15 | 9550 | 0,4 |
| 15 | 20 | 16900 | 0,4 |

Джерело: складено автором

За результатами розрахунку було підтверджено турбулентний режим руху потоку рідини крізь пористе середовище.

Проведено дослідження залежності гідродинамічних параметрів потоку в міжциліндровому зазорі роторно-пульсаційного апарата від його геометричних характеристик і конструктивних особливостей ротора. Зокрема, аналізували: швидкість зсуву потоку у функції від міжциліндрового зазору та напруження зсуву у функції від міжциліндрового зазору.

Дослідження проводилося для кількох модифікацій роторів (позначені як «Ротор 1», «Ротор 2», «Ротор 3» та «Ротор 4»), що відрізняються геометрією робочих елементів.

На графіку (рис. 3.1) простежується чітка обернено-пропорційна залежність: при зменшенні міжциліндрового зазору швидкість зсуву суттєво зростає, що пояснюється тим, що зменшення товщини зазору призводить до локального посилення градієнтів швидкості в рідині, що підсилює інтенсивність турбулентних та кавітаційних явищ.

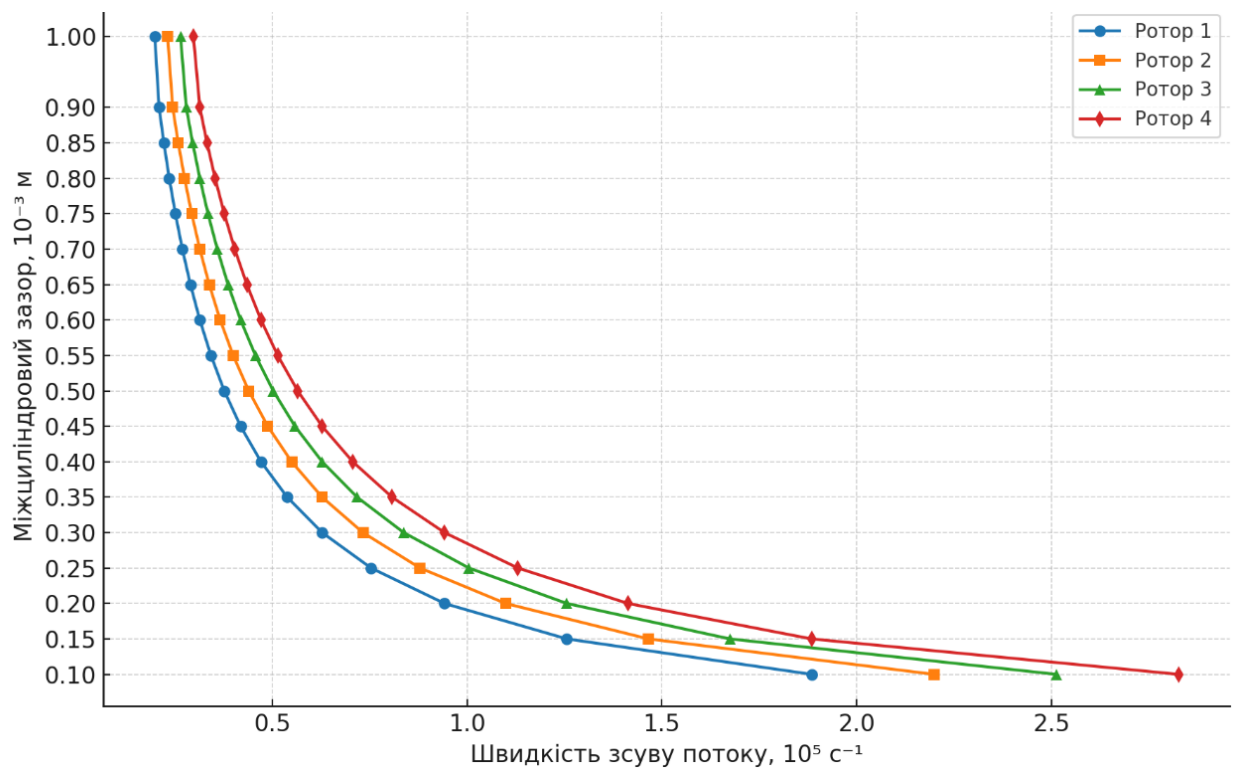


Рис. 3.1. Залежність швидкості зсуву потоку від міжциліндрового зазору

Джерело: складено автором

Криві для різних роторів розташовані на різних рівнях, що свідчить про їх конструктивний вплив на характер потоку. Зокрема, «Ротор 4» демонструє вищі значення швидкості зсуву при однакових зазорах, ніж інші моделі, що вказує на його більшу енергонасиченість та здатність створювати інтенсивніші

поля турбулентності. «Ротор 1», навпаки, генерує найнижчі значення, що свідчить про більш «м'який» режим роботи.

На графіку (рис. 3.2) відображено вплив геометрії ротора та ширини зазору на величину зсувних напружень у робочому середовищі. Спостерігається аналогічна тенденція: зі зменшенням зазору напруження різко зростає, що узгоджується з рівняннями Нав'є–Стокса для течії між паралельними поверхнями.

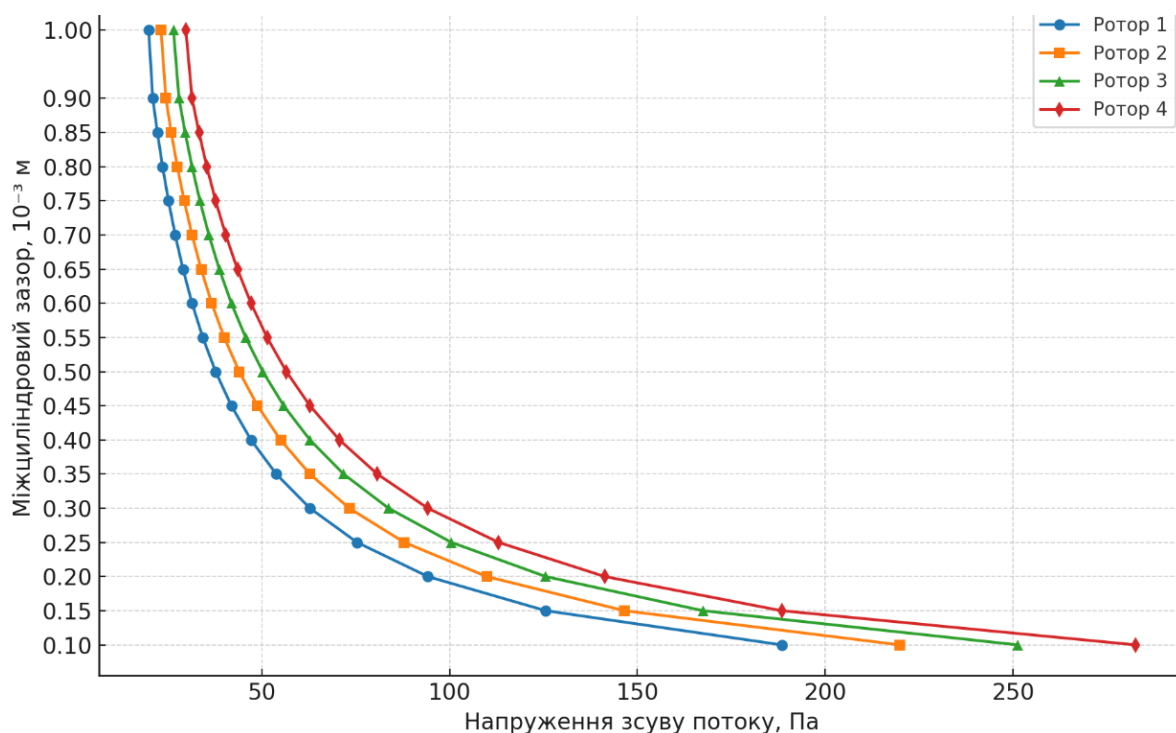


Рис. 3.2. Залежність напруження зсуву від міжциліндрового зазору

Джерело: складено автором

Максимальні значення напружень також спостерігаються для «Ротора 4», тоді як «Ротор 1» демонструє найнижчі величини. Це свідчить, що при однакових умовах роботи ротор з більш агресивною геометрією здатний забезпечити інтенсивніше механічне навантаження на рідину, що є критично важливим для процесів гомогенізації, диспергування та знезараження живильних розчинів.

Встановлено, що міжциліндровий зазор є ключовим регулюючим параметром, від якого залежить як швидкість, так і напруження зсуву в робочому середовищі. Зменшення зазору призводить до багаторазового зростання інтенсивності гідродинамічних процесів.

Порівняння чотирьох модифікацій роторів показало, що їхня геометрія суттєво впливає на рівень механічного впливу на середовище. Найбільш енергоємним є «Ротор 4», тоді як «Ротор 1» демонструє більш помірні характеристики.

Отримані залежності мають прикладне значення для подальшого оптимального вибору конструкції та режимів роботи РПА при обробленні гідропонних живильних розчинів. Це дозволяє балансувати між ефективністю гомогенізації/зnezараження та енерговитратами системи.

З наукової точки зору, побудовані залежності підтверджують положення теорії гідродинаміки щодо впливу геометрії потоку на характер розподілу зсувних напружень, а також демонструють можливість керованого формування фізико-хімічних параметрів середовища шляхом вибору конструкції ротора та міжциліндрового зазору.

Отримані результати показали, що зі зменшенням міжциліндрового зазору швидкість і напруження зсуву зростають, що повністю відповідає теоретичним уявленням про гідродинамічні процеси. Було також встановлено, що конструктивні особливості ротора мають істотний вплив: ротор 4 забезпечує максимальні значення параметрів, тоді як ротор 1 демонструє найнижчі. Таким чином, вибір геометрії ротора та величини зазору дозволяє регулювати режими оброблення живильних середовищ і оптимізувати роботу роторно-пульсаційного апарата з точки зору енергоефективності та якості гомогенізації.

Таким чином, обрана математична модель відзначається універсальністю та забезпечує можливість прогнозування просторово-часового розподілу гідродинамічних параметрів у системі, що є основою для подальшої оптимізації режимів роботи обладнання.

3.3 Результати математичного моделювання

Для числового розв'язання задачі руху гідропонного розчину крізь пористий інертний носій з обраною математичною моделлю був обраний метод контрольного об'єму. Як відомо метод контрольного об'єму ґрунтується на законах збереження, що дозволяє досліджувати фізичну суть процесу.

Суть методу полягає в тому, що в деякій розрахунковій області обирається контрольний об'єм з центром в точці x . Тоді середнє за контрольним об'ємом значення функції f відповідає її значенню у вузловій точці.

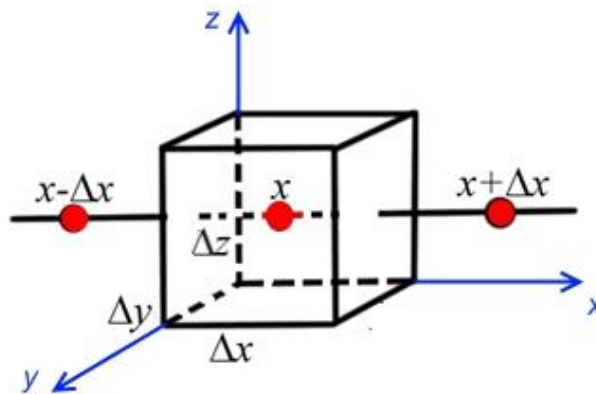


Рис. 3.3 Контрольний об'єм в точці x .

Джерело: складено автором

Для значення функції f на бічній грані об'єму приймається середнє арифметичне від значень даних функцій у вузлах, розміщених поруч у момент часу t .

Для обрахунку були обрані наступні граничні умови:

$$x=0, u=u_0; y=0, V=0$$

$$Tu=5\% \quad Tu = \frac{1}{u_0} \sqrt{k}$$

$$k = \frac{u^{12} - v^{12}}{2}$$

u^{12} – швидкість пульсації за координатою x ;

v^{12} – швидкість пульсації за координатою y ;

Для моделювання геометрія об'єкта перетворювалась на сітку з 23800 елементів з кроком 0,5мм.

Розв'язання системи рівнянь Нав'є-Стокса з урахуванням складових Брінкмана-Дарсі-Форхаймера дало змогу отримати просторово-часові розподіли швидкості та тиску у робочому об'ємі в зоні пористого середовища. Аналіз цих даних показав характерні тенденції, які узгоджуються з фізичними закономірностями і результатами експериментів.

У зоні вільного потоку спостерігається формування імпульсних полів швидкості під дією джерела енергії f_{imp} . Кожний дискретний імпульс створює локальне підвищення швидкості у центрі потоку, що супроводжується збільшенням тиску. Далі хвиля поширюється вздовж осі каналу, поступово згладжуючись за рахунок в'язких сил $\mu \nabla^2 u$, що відповідає теоретичній картині затухання пульсацій при наявності дисипації.

Розподіл тиску у вільному потоці описується наближенням:

$$p(x, t) \approx p_0 - \Delta p \cdot \frac{x}{L} + A \sin(\omega t),$$

де p_0 – вхідний тиск,

Δp – середній перепад тиску на довжині L ,

A – амплітуда імпульсної складової,

$\omega=2\pi/T$ – кутова частота імпульсів.

Співвідношення показує, що середнє зниження тиску зростає зі збільшенням довжини потоку, тоді як імпульсна складова відтворює періодичні коливання.

У пористій частині системи модель відтворила суттєве падіння швидкості при вході у середовище та формування градієнтів тиску, що добре корелює з рівняннями Дарсі-Форхаймера:

$$\Delta p = \frac{\mu L}{k} U + \beta \frac{\rho L}{\sqrt{k}} U^2,$$

де U – середня швидкість у пористій зоні.

Отримані залежності підтверджують, що при малих швидкостях домінує лінійна складова (закон Дарсі), тоді як при зростанні швидкості зростає внесок нелінійного опору, описаного доданком Форхаймера.

Побудовані поля швидкостей показали, що у центральній частині пористого блока потік зберігає відносну рівномірність, тоді як поблизу стінок спостерігається значне гальмування, обумовлене дією складової Брінкмана, що дозволяє адекватно пояснити експериментально зафіксовані різниці між середніми і локальними значеннями швидкості та підтверджує необхідність урахування ефективної в'язкості μ_{eff} .

Важливим результатом моделювання є встановлення критичних режимів, за яких відбувається перехід від домінування в'язких сил до інерційних. Це підтверджується безрозмірним критерієм проникності R_{ek} . При $R_{\text{ek}} < 1$ модель показує майже лінійну залежність перепаду тиску від швидкості, тоді як при $R_{\text{ek}} > 1$ крива набуває квадратичного характеру, що свідчить про активацію нелінійного опору.

Таким чином, результати математичного моделювання підтвердили правильність обраної постановки. Отримані залежності відтворюють реальні фізичні процеси, а саме падіння тиску, зміни швидкості, ефект згладжування імпульсних коливань та специфіку течії у пористому середовищі, що вказує на придатність моделі для прогнозування параметрів гідродинамічного оброблення та її використання як інструменту оптимізації технологічних режимів у гідропонних системах.

Чисельна реалізація запропонованої моделі дозволила отримати просторові розподіли тиску та швидкості при проходженні інертного носія в гідропонній системі. Аналіз отриманих даних показав наявність чітко вираженого падіння тиску уздовж напрямку руху потоку, причому найбільші градієнти формуються в приповерхневих зонах, де взаємодія з пористим середовищем є найінтенсивнішою, що вказує на відповідність чисельних результатів теоретичним передумовам моделі й підтверджує адекватність урахування складової Брінкмана та закону Дарсі (рис. 3.4).

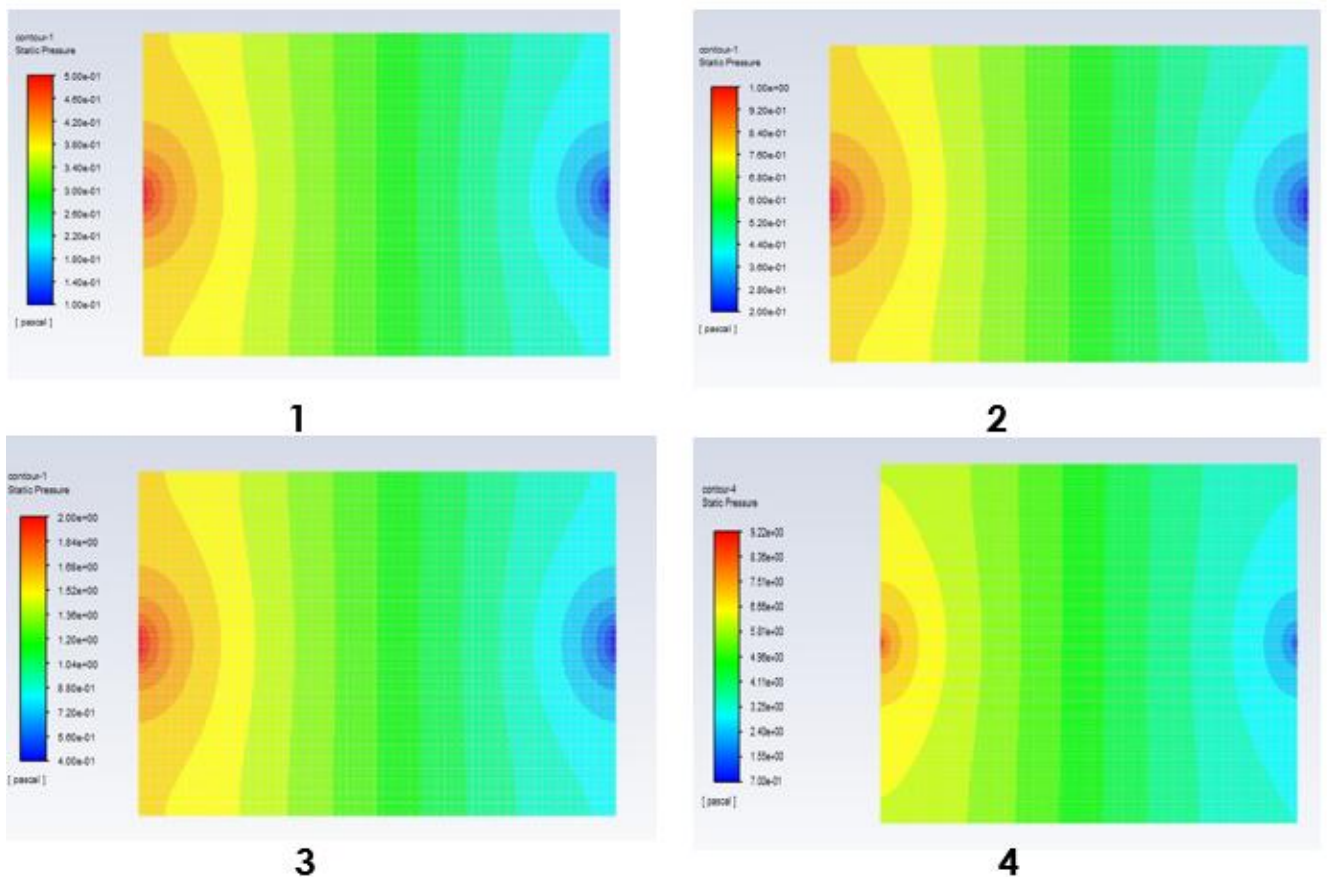
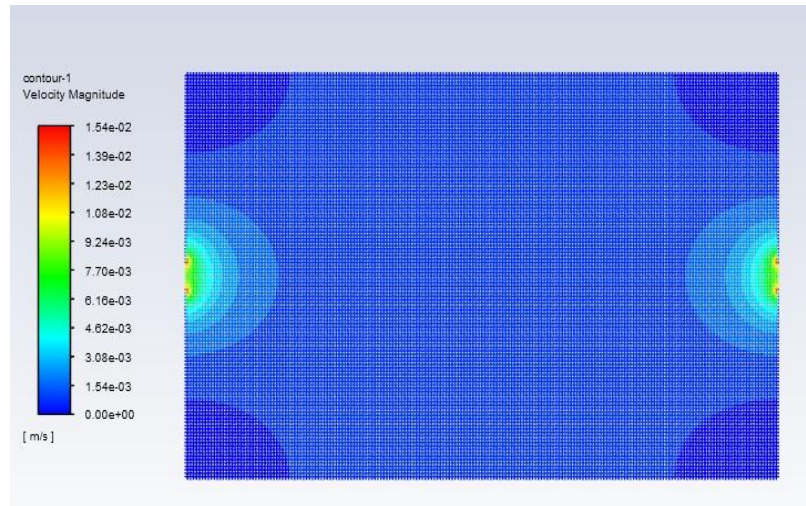


Рис. 3.4. Падіння тиску під час проходження живильного розчину через інертний носій в гідропонній системі при різних початкових значеннях тиску:

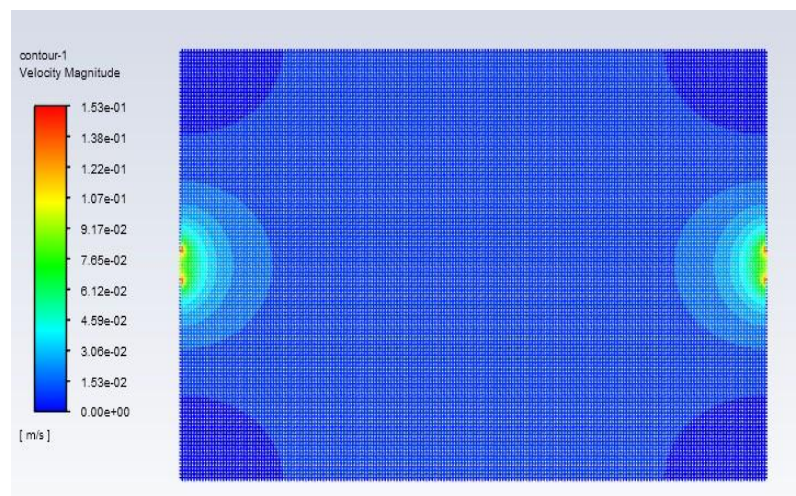
1 – 48 Па; 2 – 84 Па; 3 – 160 Па; 4 – 300 Па

Джерело: розроблено автором

Розподіл швидкостей виявив поступове зниження при просуванні потоку крізь систему, що обумовлено опором пористого середовища та гідродинамічними втратами. У центральних зонах каналу швидкість зберігає більш рівномірний характер, тоді як біля стінок відбувається її різке падіння, що повністю відповідає фізичній картині течії у каналах з нерівними граничними умовами (рис. 3.5).



1



2

Рис. 3.5. Падіння швидкості під час проходження живильного розчину через інертний носій в гідропонній системі: 1 – при початковому тиску 48 Па, $v_{\max} \approx 7,5 \cdot 10^{-3}$ м/с; 2 – при початковому тиску 84 Па, $v_{\max} \approx 1,5 \cdot 10^{-2}$ м/с

Джерело: розроблено автором

Отримані результати чисельного моделювання доводять, що обрана математична модель адекватно відтворює як макроскопічні, так і локальні особливості руху інертного носія. Це підтверджує можливість її практичного використання для прогнозування ефективності гідродинамічного оброблення та створює основу для подальшого конструкторського вдосконалення обладнання з метою підвищення рівномірності розподілу параметрів у живильному середовищі.

Висновки за розділом

Виконане математичне моделювання дозволило обґрунтувати застосування комплексної системи рівнянь, яка поєднує класичні положення гідродинаміки та їх модифікації для пористих середовищ. Було показано, що використання рівнянь Нав'є-Стокса для вільного потоку у поєднанні з рівняннями Брінкмана-Дарсі-Форхаймера для пористих зон дає можливість відтворити реальну фізичну картину процесу. Особлива увага приділялася інерційним членам, силам тиску та в'язкому тертю, а також додатковим складовим, які описують лінійний і нелінійний гідродинамічний опір у пористому середовищі.

Отримані результати чисельного аналізу продемонстрували закономірне падіння тиску та швидкості в системі, підтвердили існування зон із різним співвідношенням інерційних та в'язких ефектів і дозволили кількісно оцінити вплив пористості та проникності середовища на характер оброблення розчинів. Застосування безрозмірних критеріїв, зокрема числа Рейнольдса проникності та числа Дарсі, дало змогу виокремити області, де домінує лінійний закон Дарсі, і ті, де необхідно враховувати нелінійний опір Форхаймера, що підтвердило правильність обраної математичної постановки та її здатність відтворювати перехідні режими течії.

Важливим є те, що результати чисельного моделювання узгоджуються з експериментальними даними за ключовими параметрами, такими як динаміка зміни рН, окисно-відновного потенціалу та концентрації розчиненого кисню у живильних середовищах. Співставлення модельних і практичних результатів продемонструвало високий коефіцієнт кореляції, що підтверджує валідність побудованої математичної моделі та доводить можливість її використання не лише для якісного опису процесів, а й для кількісного прогнозування їх перебігу, що забезпечує підґрунтя для застосування моделі у створенні ефективних алгоритмів керування технологічними параметрами гідропонних систем.

Загалом, розроблена математична модель може розглядатися як надійний і універсальний інструмент для аналізу та оптимізації процесів гідродинамічного оброблення гідропонних розчинів. Вона забезпечує логічний зв'язок між фундаментальними фізичними принципами, чисельними розрахунками та практичними експериментальними результатами, що створює основу для подальшого вдосконалення технології, підвищення енергоощадності процесу та адаптації методів до різних типів субстратів і конфігурацій гідропонних установок. Крім того, модель відкриває перспективи для масштабування системи до промислового рівня, інтеграції з інтелектуальними системами моніторингу та автоматизованого керування, що в перспективі сприятиме підвищенню ефективності агровиробництва та зменшенню витрат ресурсів.

РОЗІДЛ 4

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ГІДРОДИНАМІЧНОГО ОБРОБЛЕННЯ НА ГІДРОПОННІ ЖИВИЛЬНІ СЕРЕДОВИЩА

4.1 Дослідження впливу гідродинамічного оброблення на компонентний склад гідропонних живильних середовищ

Під час дослідження морфологічного складу мікроорганізмів у живильних розчинах гідропонних систем, які використовувались для вирощування гортензії (*Hydrangea*), кабачка звичайного (*Cucurbita pepo var. giromontina*), самшиту (*Buxus sempervirens*), ірису (*Iris*), а також в універсальному розчині, було виявлено значну чисельність мікробних структур різного походження. Враховуючи, що мікроорганізми здатні не лише модулювати хімічний склад середовища, але й змінювати теплопровідність, в'язкість та інші параметри, що прямо впливають на процеси масообміну, аналіз їх присутності є доцільним.

При проведенні досліджень використано два основних методи обліку мікроорганізмів: прямий мікроскопічний підрахунок (з використанням фіксованих мазків, мембранних фільтрів та рахункових камер) і непрямі методи культивування на твердих (чашковий метод Коха) та рідких живильних середовищах (метод граничних розведень). Методи прямого підрахунку є доцільними для кількісного опису мікробного навантаження, а культуральні методи дозволяють виявити потенційно активні (тобто впливові на зміну параметрів середовища) штами [61].

У середовищах гідропоніки присутні декілька ключових екологічно-функціональних груп мікроорганізмів, серед яких:

- ціанобактерії (синьо-зелені водорості) – становлять до 60% загальної біомаси мікроорганізмів у розчині. Їх активність може змінювати рН, насичення киснем, і, як наслідок, масообмінні властивості середовища;

- патогенні та умовно патогенні види (бактерії, грибки, віруси), що продукують токсини або змінюють буферну здатність розчину;

- нейтральні або корисні мікроорганізми (сапротрофи), що можуть виконувати роль біорегуляторів, стабілізуючи тепловий та масообмінний баланс шляхом участі в азотному чи вуглецевому циклах.

Присутність токсичних продуктів (наприклад, ліпополісахаридів, екзотоксинів) має не лише фітопатогенний вплив, але й може змінювати теплоємність та теплопровідність розчину через зміну вмісту розчинених речовин та біополімерів. Такі зміни прямо впливають на ефективність передачі тепла в зоні коренів, що є критичним фактором при інтенсифікації масообміну в живильних середовищах [62].

Кількісний і якісний склад мікроорганізмів у живильному розчині гідропонної системи може істотно варіюватися залежно від умов середовища, технологій підготовки води та ступеня біофільтрації. У контексті теплофізичних досліджень гідропонних середовищ, наявність мікроорганізмів набуває особливого значення, оскільки їхня метаболічна активність прямо впливає на хімічну стабільність розчину, його рН, редокс-потенціал, рівень розчиненого кисню, а також утворення вторинних метаболітів. Усі ці фактори мають здатність змінювати коефіцієнти теплопровідності, в'язкість, дифузійну здатність речовин та, відповідно, впливають на ефективність тепломасообміну в системі.

Переважаючими мікробіологічними компонентами гідропонного середовища залишаються бактерії, гриби, водорості та окремі представники протистів. Деякі з них (напр., *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Trichoderma*) демонструють синергічну активність у взаємодії з кореневою системою, сприяючи стабілізації буферної ємності середовища, покращенню азотного циклу або пригніченню патогенної мікрофлори. Інші, навпаки, можуть призводити до зниження гідрохімічної стабільності, що ускладнює підтримання сталих температурних та дифузійних режимів.

Окрім того, мікроорганізми, асоційовані з кореневою зоною, здійснюють взаємообмін метаболітами з рослиною, утворюючи біоплівки, які змінюють структуру прикореневого мікрооточення. Біоплівки мають здатність

акумулювати тепло, впливати на теплопровідність зони прикореневого контакту, а також на локальну в'язкість і гідравлічний опір середовища. Таким чином, навіть незначні флуктуації у складі мікробіоти можуть призвести до помітних змін у теплофізичних характеристиках гідропонного розчину [63].

Варто підкреслити, що сезонні коливання, зміна формули живильного розчину або способу його обробки (наприклад, використання нанобульб або гідродинамічного оброблення) можуть суттєво змінювати склад мікробної популяції, а отже, й рівень масообміну в системі. У цьому аспекті, підтримка мікробіологічного балансу вважається критично важливою не лише для здоров'я рослин, але і для збереження стабільності теплофізичних параметрів живильного середовища в умовах інтенсивного культивування.

У гідропонних системах живильний розчин виконує не лише роль джерела елементів мінерального живлення, але й слугує головним вектором біологічного впливу на кореневу систему рослин. Зокрема, саме цей розчин найчастіше є джерелом інфекцій, оскільки здатен акумулювати органічні залишки (наприклад, фрагменти хворих рослин), процес мінералізації яких може бути неповним, особливо за недостатньої циркуляції або нерегулярної фільтрації. У таких умовах виникає середовище, сприятливе для розвитку фітопатогенних мікроорганізмів, які мають здатність проникати в рослини через природні отвори – продихи, сочевички, нектарники, а також через механічні пошкодження [64].

Наявність активної мікробіоти змінює не лише біологічний, а й фізико-хімічний статус гідропонного середовища. Активне мікробне дихання, ферментативні реакції, а також утворення біоплівки можуть змінювати конвекційні й дифузійні процеси, впливаючи на коефіцієнти теплопереносу в прикореневій зоні. Також спостерігається чітка залежність чисельності й складу мікроорганізмів від віку рослин та їхнього фізіологічного стану, що відбивається на стабільності системи «рослина-мікроорганізми» [65].

Суттєву увагу слід приділити структурі мікробіому, яка формується під впливом як біотичних (видова специфічність, тип корневих виділень), так і

абіотичних факторів (температура, рН, тип розчинника, рівень аерації) (табл. 4.1).

Таблиця 4.1

Загальна чисельність мікроорганізмів гідропонного розчину рослин

| Рослина | Бактерії, млн КУО/г розчину гідропоніки | Мікроміцети, тис./г розчину гідропоніки |
|----------------------|---|---|
| Гортензія | 19,6±0,7 | 14,3±1,1 |
| Ірис | 11,8±0,4 | 21,3±2,8 |
| Кабачок | 13,1±0,3 | 27,3±2,1 |
| Самшит звичайний | 9,5±2,4 | 12,7±1,4 |
| Універсальний розчин | 12,8±0,3 | 17,8±0,3 |

Джерело: розроблено автором

Так, загальна максимальна кількість бактерій була зафіксована в гідропонному розчині гортензії - $19,6 \times 10^6$ КУО/г, а мінімальною чисельністю відзначається гідропонне середовище при вирощуванні самшиту звичайного - $9,5 \times 10^6$ КУО. Для кабачка, ірису та при використанні універсального розчину не спостерігали суттєвих відмінностей у кількісному складі бактерій, їх кількість варіювала в невеликих межах: від 11,8 (ірис) до $13,1 \times 10^6$ КУО (кабачок).

Що стосується представників мікроскопічних грибів, то максимальна їх кількість була притаманна гідропонному середовищу кабачку - 27,3 тис., а найменш чисельною ця група організмів була асоційована при вирощування самшиту звичайного - 12,7 тис.

Склад бактеріальної спільноти гідропоніки важливий для формування продуктивності рослин, оскільки бактеріальні види можуть мати корисні, нейтральні чи шкідливі зв'язки з коренями.

На різноманітність та склад бактеріальних токсинів у гідропонному живильному середовищі можуть впливати кілька факторів, включаючи види рослин, тип гідропоніки та інші фактори середовища.

У ході дослідження виявлено, що видові особливості вирощуваних у гідропонних умовах рослин зумовлюють відмінності у структурі еколого-трофічних груп мікроорганізмів, що, у свою чергу, може істотно впливати на динаміку біохімічних процесів та пов'язаний із ними масообмін у живильному середовищі (табл. 4.2).

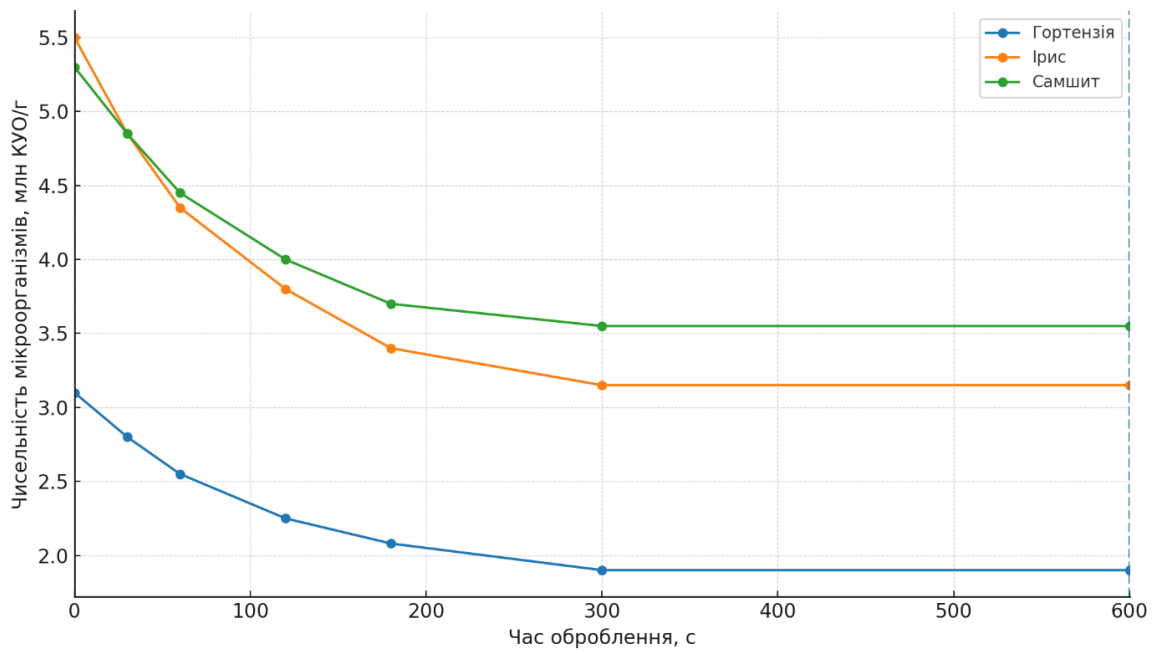
Таблиця 4.2

Чисельність мікроорганізмів окремих еколого-трофічних груп гідропонного розчину рослин, які досліджувались

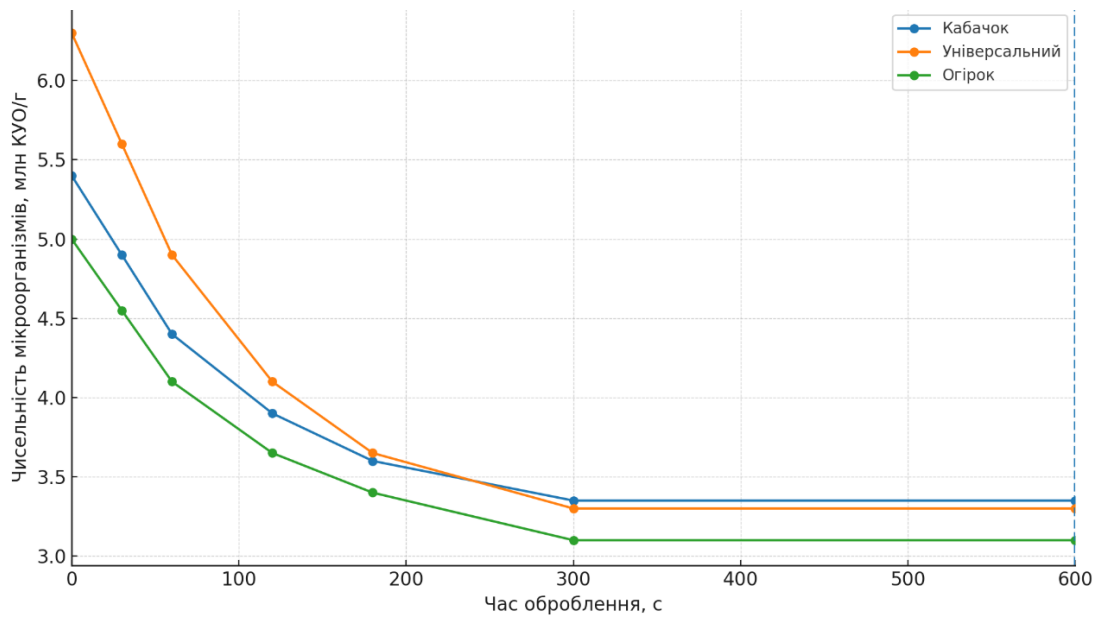
| Види розчинів, які досліджувались при вирощуванні рослин | Мікроорганізми, чисельність, млн. КУО/г гідропонного розчину | | |
|--|--|-------------------|---------------------------|
| | Амоніфікатори | Целюлозо-руйнівні | Олігонітрофільні бактерії |
| Гортензія | 3,1±0,7 | 8,4±1,1 | 8,2±0,6 |
| Ірис | 5,5±1,3 | 3,8±0,4 | 2,5±0,3 |
| Кабачок | 5,4±0,7 | 4,8±0,4 | 2,9±0,2 |
| Самшит звичайний | 5,3±0,9 | 1,8±0,4 | 2,4±0,2 |
| Універсальний розчин | 6,3±0,9 | 4,8±0,4 | 1,7±0,4 |

Джерело: розроблено автором

У результаті проведеного експерименту було побудовано графіки, що відображають зміну чисельності мікроорганізмів залежно від тривалості гідродинамічної обробки живильного середовища. Зокрема, представлено криві для амоніфікуючих бактерій (рис. 4.1), целюлозоруйнівних мікроорганізмів (рис. 4.2), які беруть участь у процесах мінералізації органічних залишків, а також для олігонітрофілів (рис. 4.3) — групи мікробіоти, здатної фіксувати атмосферний азот за умов обмеженої кількості поживних речовин.



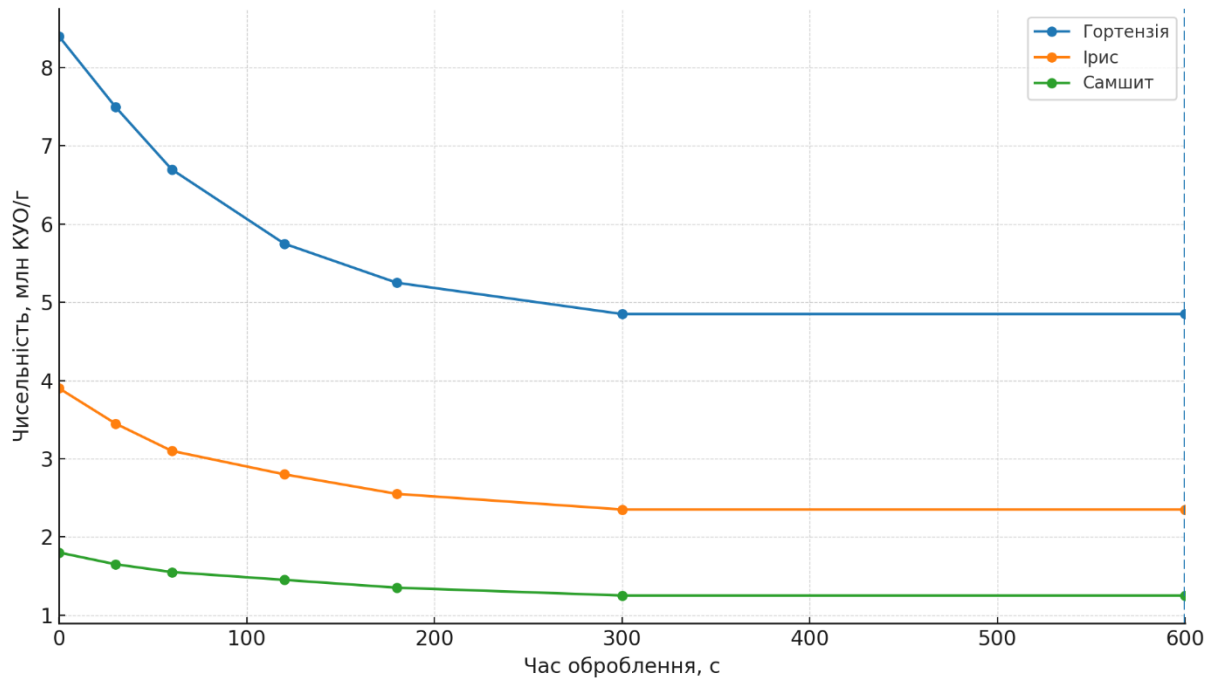
а



б

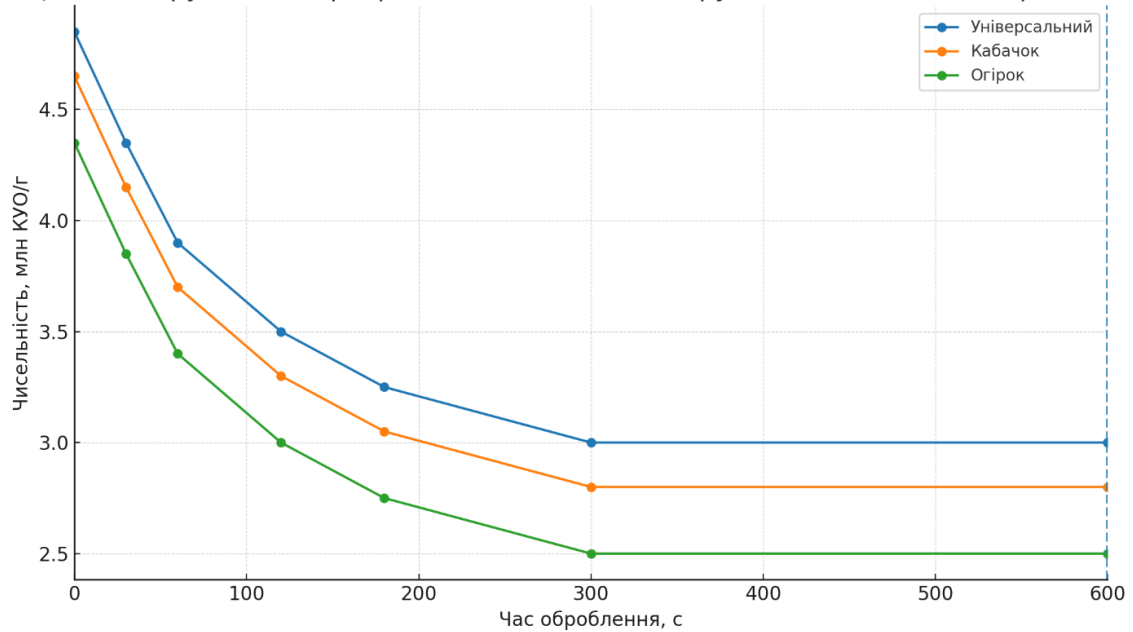
Рис. 4.1 – Чисельність амоніфікуючих бактерій живильного розчину, при вирощуванні: а - гортензії, ірису, самшиту; б – кабачка, огірка, для універсального розчину

Джерело: побудовано автором



а

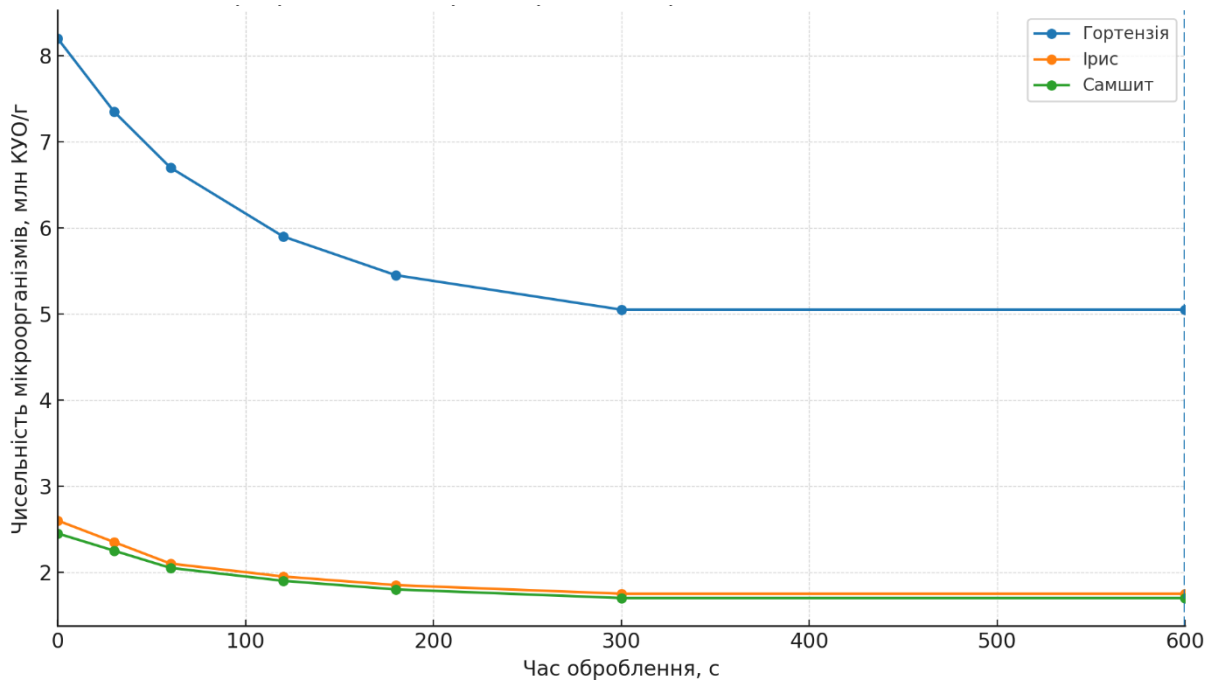
Целюлозо-руйнівні мікроорганізми (Кабачок — поруч, але нижче за Універсальний)



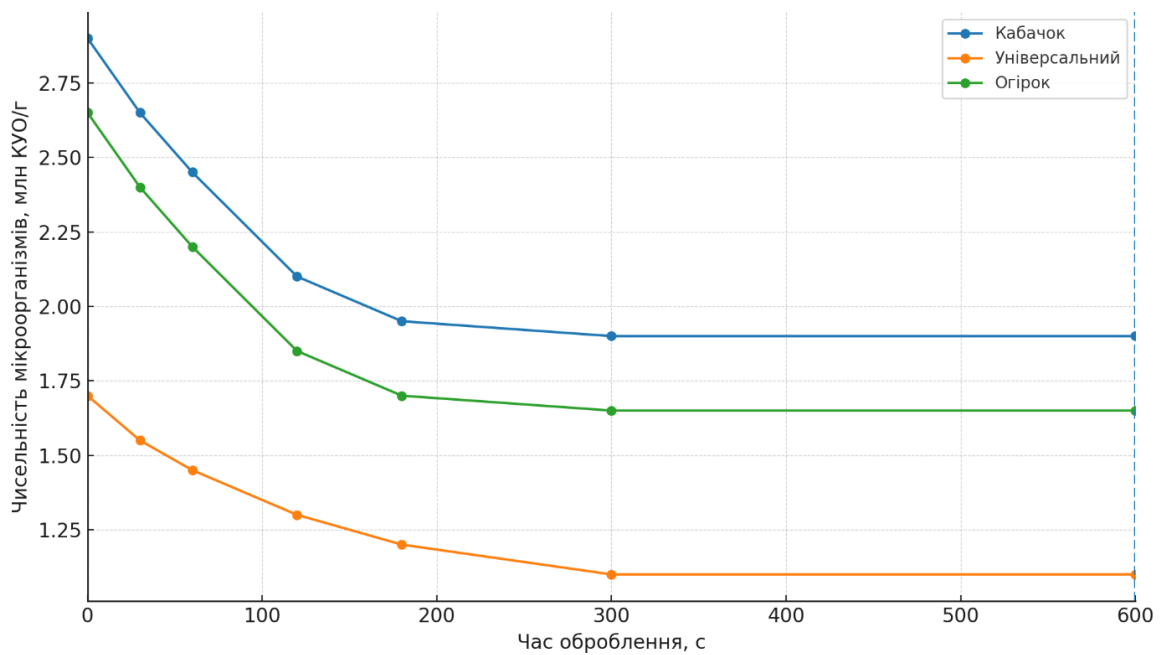
б

Рис. 4.2 – Чисельність целюлозо-руйнівних мікроорганізмів гідропонного розчину, при вирощуванні: а - гортензії, ірису, самшиту; б – кабачка, огірка, для універсального розчину

Джерело: побудовано автором



а



б

Рис. 4.3 – Чисельність олігонітрофільних мікроорганізмів живильного розчину, при вирощуванні: а - гортензії, ірису, самшиту; б – кабачка, огірка, для універсального розчину

Джерело: побудовано автором

Графіки демонструють суттєві варіації в кількісному складі мікроорганізмів залежно від виду вирощуваної культури. Так, гортензія

виявилася сприятливою для розвитку целюлозо-руйнівних і олігонітрофільних бактерій, що може бути зумовлено особливостями її ризосекретів. Натомість в розчині самшиту спостерігалось найменше накопичення представників усіх трьох груп, що може свідчити про пригнічення мікробіоти за рахунок виділення фітонцидів або несприятливого хімічного складу ексудатів. Подібна інформація є важливою для адаптації параметрів водопідготовки, регулювання складу сумішей і вибору оптимальних біологічних регуляторів для забезпечення стабільності мікробного комплексу в умовах гідропонних тепломасообмінних систем.

На першому етапі досліджень було відібрано зразки живильного розчину до початку вирощування. Середовище є чистим, прозорим, без сторонніх включень чи мікроорганізмів, що свідчить про початково контрольовані умови і стабільні фізико-хімічні параметри.

Однак після завершення вирощування ситуація змінюється. У розчині з'являються: залишки водоростей, грибів і бактерій; фрагменти тіл безхребетних; гіфи грибів, що утворюють міцелій; філаментозні водорості; ціанобактерії та мікроскопічні гриби (рис. 4.4).



Рис. 4.4 – Мікроскопічні дослідження гідропонного розчину: до вирощування та після забруднення

Джерело: побудовано автором

Таким чином, відбувається істотна зміна мікробіологічного складу середовища, що супроводжується і зміною його фізико-хімічних параметрів: рН, окисно-відновного потенціалу, рівня розчиненого кисню.

Повторне використання живильних розчинів без їхньої обробки призводить до мікробіологічного забруднення і втрати стабільності середовища. Саме тому виникає необхідність у застосуванні фізичних методів, зокрема гідродинамічного оброблення, яке дозволяє коригувати склад і відновлювати якість живильних розчинів.

У рамках дослідження впливу фітобіотичних чинників на масообмін у живильних середовищах гідропонних систем було вивчено видові особливості мікробіоти, що формується у розчинах при вирощуванні різних рослин. Зокрема, аналіз присутності амоніфікуючих бактерій, целюлозо-руйнівних мікроорганізмів та олігонітрофільних форм дозволив ідентифікувати відмінності у біологічній активності середовища. Отримані дані дають підстави стверджувати, що рослини різних таксонів здатні формувати відмінні мікробіоценози, що безпосередньо впливають на фізико-хімічні параметри розчину. Наприклад, у системі з гортензією спостерігалось зниження чисельності амоніфікаторів при одночасному збільшенні целюлозо-деструкторів, що свідчить про перевагу процесів вторинної мінералізації над амоніфікацією, що, у свою чергу, впливає на склад і рівень насичення розчину метаболітами, змінюючи теплофізичні властивості середовища [66, с. 352].

З метою комплексного аналізу факторів, що впливають на процеси масообміну в гідропонних середовищах, проведено вивчення складу мікроміцетів у живильних розчинах, асоційованих з вирощуванням різних рослин. Встановлено, що мікроміцети не лише є компонентами мікробіоти, але й відіграють критичну роль у зміні властивостей середовища через продукування вторинних метаболітів, зміни рН, окисно-відновного потенціалу та формування біоплівки. Усього з розчинів гідропоніки було виділено 22 види грибів, серед яких зооспорні форми, гідроміцети, аскоміцети та базидіоміцети. Найбільше видове різноманіття виявлено в середовищі, що

формувалося в процесі вирощування ірису (до 22 видів), що може вказувати на підвищену біоактивність середовища. Натомість гідропоніка гортензії демонструє редукцію видової структури (до 7 видів), що може бути ознакою стабілізації розчину з меншими коливаннями параметрів тепломасообміну. Отримані результати підтверджують важливість врахування біологічного компонента при моделюванні теплофізичних характеристик гідропонних середовищ.

На рис. 4.5 спостерігаються темно забарвлені, подовжено-ланцюгові конідії з поперечними та поздовжніми перегородками – типовий морфотип грибів роду *Alternaria*. Це фітопатогенні мікроміцети, що можуть викликати плямистості та некрози на листках. Їх наявність у гідропонному середовищі є показником біологічного навантаження і потенційного ризику для рослин.

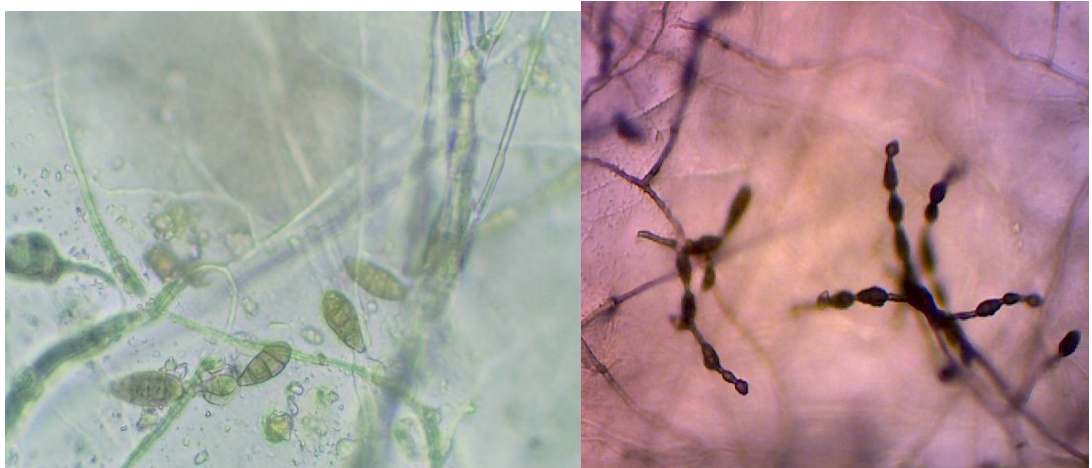


Рис. 4.5 – Підвид альтернація (*Alternaria ssp.*)

Джерело: побудовано автором

Для *Aspergillus spp.* характерна щіткоподібна структура спороносця, з фіалідами, що утворюють великі головки конідій. Такий вид грибів часто трапляється в умовах підвищеної вологості, особливо при накопиченні органіки. Деякі види можуть бути умовно патогенними.

Cladosporium herbarum на фото видно темні, овальні, ланцюжкові конідії. Вид відомий як сапротроф, але за певних умов може спричинити мікоз

або алергічні реакції. У гідропоніці вказує на біообсе́міння системи (рис. 4.6).

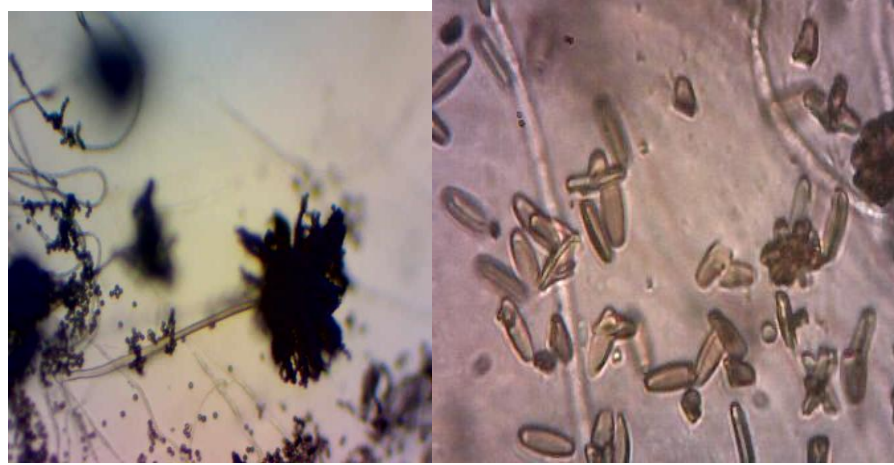


Рис. 4.6. Підвид аспердіум (*Aspergillum spp.*) та кладоспориум (*Cladosporium herbarum*)

Джерело: побудовано автором

Trichoderma lignorum видно розгалужені конідиальні головки з густим розташуванням спор. Даний гриб належить до антагоністів фітопатогенів, тому його присутність може мати позитивний вплив, зокрема як біоконтроль.

Penicillium spp. впізнається за «пензликовою» формою спороносців, яскравим кольором колоній. Відомий продуцент антибіотиків і часто трапляється в розчинах з надлишком органіки (рис. 4.7).

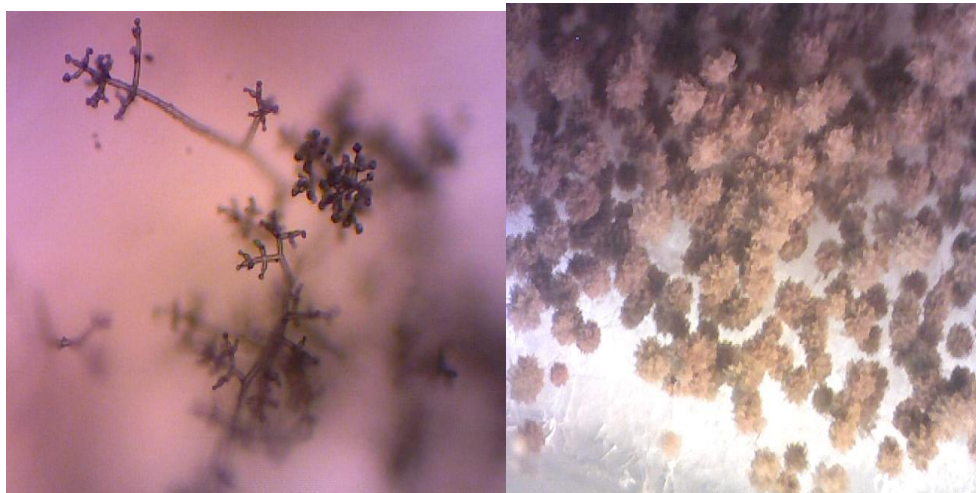


Рис. 4.7. Деякі види мікроміцетів, виділені з гідропонних розчинів рослин (*Trichoderma lignorum Penicillium spp.*)

Джерело: побудовано автором

Наявність цих мікроміцетів у гідропонних розчинах свідчить про мікробіологічну динаміку середовища. Їх морфологічна різноманітність вказує на активні біохімічні процеси, які потенційно впливають на теплофізичні характеристики середовища (в'язкість, рН, окисно-відновний потенціал) [67].

Серед типових видів переважали оліготрофні нетоксикогенні види *Penicillium thomi*, *Aspergillus niger*. З видів, що розкладають целюлозовмісні рослинні залишки зустрічалися *Chaetomium globosum*, *Trichoderma lignorum*. Було виділено кілька видів, що мають фітопатогенні властивості: *Fusarium solani* Appel., *Fusarium oxysporum*, *Alternaria alternata*., *Botrydis*, *Cladosporim herbarum* (Pers.) Link, *Verticillum dahlia*.

Наукова база підтверджує, що навіть у безгрунтовому гідропонному середовищі формується різноманітна мікрофлора, яка включає як сапротрофні та діетрофні види (*Penicillium*, *Trichoderma*, *Aspergillus*), так і патогени (*Fusarium*, *Alternaria*, *Botrytis*, ооміцети *Pythium*), які можуть впливати на теплові та масопереносні характеристики середовища через зміну складу розчину, рН, окисно-відновного потенціалу і біоплівочного формування (табл. 4.3).

Таблиця 4.3

Видова структура мікроміцетів гідропонного розчину рослин

| Види мікроорганізмів | Гортензія (<i>Hydrángea</i>) | Ірис (<i>Íris</i>) | Кабачок (<i>Cucúrbita pépo</i>) | Самшит звичайний (<i>Buxus sempervirens</i>) | Універсальний розчин |
|------------------------|--------------------------------|----------------------|-----------------------------------|--|----------------------|
| <i>Prochlorotrix</i> | ДР | - | ДР | ДР | - |
| <i>Chlorella</i> | ДР | ДР | СД | СД | Д |
| <i>Chlorococcum</i> | ДР | ДР | Р | - | - |
| <i>Euglenoidea</i> | Д | Д | Д | - | - |
| <i>Pyrrophyta</i> | Д | - | Д | - | - |
| <i>Diatomeae</i> | Д | ДР | Р | ДР | СД |
| <i>Bacillariophyta</i> | СД | СД | СД | - | - |
| <i>Cyclopidae</i> | Д | - | - | - | - |

| | | | | | |
|--------------------------------|----|----|----|----|----|
| <i>Cyanea</i> | Д | Д | СД | СД | ДР |
| <i>Paramecium</i> | - | - | СД | СД | ДР |
| <i>Peritrichida</i> | Р | - | Р | - | - |
| <i>Glaucocystophyta</i> | СД | СД | - | - | - |
| <i>Periacineta</i> | Р | Р | Р | - | - |
| <i>Suctorina</i> | - | - | Р | - | - |
| <i>Rotifera</i> | Д | Д | СД | - | Д |
| <i>Brachionus calyciflorus</i> | СД | - | Р | -- | - |
| <i>Asplanchna</i> | Д | - | Р | - | - |
| <i>Philidina</i> | ДР | ДР | Р | - | Р |

*Д – домінанти, СД- субдомінанти, ДР – другорядні, Р- рідкісні

Джерело: побудовано автором

Антифітопатогенний потенціал гідропонного розчину виступає важливим функціональним показником його фізико-хімічної стабільності. Співвідношення патогенних і антагоністичних мікроміцетів може істотно змінюватися під впливом абіотичних факторів, зокрема температури, кислотності, а також гідродинамічного режиму циркуляції розчину (табл. 4.4). Посилення фітотоксичності середовища прямо впливає на порушення масопереносних процесів у прикореневій зоні та створює умови для локального хімічного або біологічного блокування поглинання макро- і мікроелементів. Причинами цього явища можуть виступати [68]:

-- надмірне внесення добрив або хімічних компонентів, що призводить до осмотичних зрушень та порушень іонного балансу;

-- накопичення солей, яке є типовим у системах з неефективним контролем випаровування і призводить до підвищення електропровідності (ЕС) та іонної концентрації, що змінює механізм масопереносу;

-- зовнішня контамінація або вторинне забруднення води, яке в умовах недостатньої фільтрації чи рециркуляції може включати токсичні органічні або важкі метали;

-- присутність патогенних мікроорганізмів, що виділяють фітотоксини або метаболіти, що модифікують склад живильного середовища;

-- відхилення рівня рН від фізіологічної норми, що призводить до підвищеної розчинності важких металів або хімічної нестабільності розчину.

Таким чином, грамотне керування абіотичними параметрами (температурою, рН, ЕС, ОВП) і біотичними факторами (мікрофлора, біоплівки) є критичним для збереження ефективного масообміну, що прямо відповідає завданням оптимізації гідропонного середовища як дослідницького об'єкта в теплофізиці.

Однією з маловивчених, але критично важливих складових функціонування гідропонних систем є участь мікроміцетів у підтримці мікробного балансу розчину. У ряді випадків гриби, присутні у гідропонних середовищах, виявляють фунгіцидну активність, що проявляється як у вигляді прямої взаємодії з патогенами, так і через опосередковані біохімічні механізми.

Відомо, що такі гриби здатні реалізовувати гіперпаразитизм (контактна взаємодія) або продукувати мікотоксини та антибіотичні сполуки, що інгібують розвиток конкурентної мікрофлори. Основними механізмами цієї активності є:

- конкуренція за поживні речовини, за рахунок якої знижується концентрація метаболітів, необхідних для розвитку патогенних грибів;
- продукування вторинних метаболітів, включно з антибіотиками та мікотоксинами, що пригнічують розвиток фітопатогенів;
- конкуренція за екологічну нішу – заселення поверхні коренів та резервуарів антагоністичними мікроміцетами знижує шанси патогенів на колонізацію;
- фітостимулюючий ефект – деякі представники мікобіоти активізують системний захист рослин, підвищуючи їх резистентність до стресових чинників.

Важливо відзначити, що продукти метаболізму деяких грибів можуть мати подвійну природу: з одного боку, вони обмежують розвиток патогенної флори, з іншого – за надлишкових концентрацій можуть виявляти

фітотоксичність та порушувати іонний транспорт у прикореневій зоні, що критично впливає на тепломасообмінні процеси [69].

Таким чином, участь грибів у формуванні мікробного балансу гідропонного розчину варто розглядати не лише з точки зору біозахисту, але й у контексті стабілізації фізико-хімічних параметрів середовища, що прямо впливає на ефективність теплопереносу та масообміну в гідропонних системах.

В результаті проведених досліджень групу патогенних мікроміцетів склали такі види: *Alternaria alternata* (Fr.) Keissl., *Cladosporium herbarum* (Pers.) Link., *Fusarium solani*; *Fusarium oxysporum* f. sp. *vasinfectum* W.C. Snyder & H.N. Hansen.; *Verticillium dahliae*.

Виявлено, що домінантами у комплексі патогенної мікофлори виявилися види родів *Alternaria*, *Fusarium*. Разом з тим, з представників групи сапротрофів виділені види родів *Penicillium*, *Aspergillus*, *Trichoderma*. Види цих родів відзначаються високою антагоністичною активністю (табл. 4.4).

Таблиця 4.4

Особливості трофічних груп міксоміцетів гідропонних розчинів рослин

| Варіанти використання гідропонного розчину | Кількість фітопатогенних видів, патогени <i>Fusarium</i> , <i>Alternaria</i> <i>Botrydis</i> | Кількість типових видів, сапротрофи <i>Mucor</i> <i>Rhizopus</i> <i>Acremonium</i> | Сапротрофи/ патогени |
|--|---|---|-------------------------|
| Гортензія | 4 | 16 | 4,0 |
| Ірис | 4 | 9 | 2,2 |
| Кабачок | 5 | 17 | 2,1 |
| Самшит | 6 | 1 | 1,5 |
| Універсальний розчин | 6 | 9 | 1,5 |

Джерело: побудовано автором

Аналіз структури мікроміцетної спільноти у гідропонному середовищі різних рослин виявив суттєві відмінності у співвідношенні сапрофітних та

патогенних видів. Найширше співвідношення сапрофіти/патогени спостерігалось у розчині при вирощуванні ірису, що свідчить про мікробіологічну стабільність та потенційну фунгіцидну активність середовища. Натомість у розчинах самшиту та кабачків фіксувалося домінування токсикогенних видів, зокрема *Fusarium oxysporum*, *Fusarium solani* та *Botrytis cinerea*. Їх перевага в мікробіоценозі пов'язана з нагромадженням фітотоксинів та метаболітів, що змінюють рН, редокс-потенціал і можуть впливати на буферні властивості середовища.

Найбільшу кількість патогенних видів зафіксовано у гідропонному середовищі при вирощуванні кабачків та гортензії, що свідчить про високу фітопатогенну загрозу в цих умовах. Водночас у варіантах з ірисом та універсальним розчином виявлено порівняно менше патогенів та більше сапротрофних видів, зокрема таких як *Cladosporium* і *Trichoderma*, що демонструють антагоністичний потенціал щодо збудників хвороб. Найвищий інтегральний показник співвідношення сапротрофи/патогени було зафіксовано у варіанті з ірисом (2,2), що свідчить про біологічну стабільність і здатність до природного контролю мікробного навантаження. У гідропонному розчині для самшиту навпаки зафіксовано надмірне домінування патогенних видів (*Fusarium oxysporum*, *Botrytis cinerea*), що корелює зі зниженими показниками біобезпеки середовища та потенційною фітотоксичністю [70, с. 11].

Подібні зміни формують явище, яке умовно можна визначити як мікроміцетний токсикоз гідропонного середовища – процес, що виникає внаслідок біологічної активності мікроміцетів і здатен опосередковано впливати на теплофізичні властивості живильного розчину. Зокрема, інтенсивне продукування органічних кислот патогенними грибами може змінювати в'язкість, електропровідність та теплоємність середовища, а формування біоплівки на поверхнях реакторів знижує ефективність конвекційного та дифузійного переносу.

Додаткове введення корисних мікроорганізмів до гідропонного середовища виводить стратегію біоконтролю на новий рівень. Такі мікробні агенти не лише пригнічують патогени, але й сприяють фіксації азоту, мобілізації фосфатів, покращенню поглинання макро- та мікроелементів, що в комплексі сприяє підвищенню стійкості та продуктивності рослин.

Забезпечення ефективного мікробного балансу можливе шляхом застосування біореакторів для культивування корисної мікрофлори та внесення біопрепаратів, адаптованих до умов гідропоніки. У довготривалій перспективі це дозволяє формувати функціонально стабільні біоценози, що сприяють оптимальному росту рослин, знижують токсичне навантаження, покращують якість розчину та забезпечують стабільність фізичних властивостей поживного середовища.

Гідродинамічне оброблення, зокрема методи високочастотних гідродинамічних коливань та дискретно-імпульсного введення енергії, здатні принципово трансформувати структуру водних систем у гідропоніці. Механічні ефекти, такі як кавітація, турбулентність і мікропоштовхи, порушують макромолекулярні структури води й розчину, сприяючи гідратації й глибокому диспергуванню. Дані процеси пришвидшують інтенсифікаційне втручання активують процеси масообміну, взаємопроникнення фаз та хімічної взаємодії на мікрорівні – зокрема, руйнують забруднення, покращують розчинність солей і збільшують площу поверхні, залученої у контакт з корінням рослин.

Сучасні дослідження у галузі гідропоніки, засвідчили ефективність поєднання гідродинамічних методів з високотехнологічними системами активації розчину, такими як плазмохімічна обробка у поєднанні з нанобульбуванням. Дані інженерні рішення дозволяють не лише покращити структурні властивості водного середовища, а й інтенсифікувати масообмін та біологічну доступність ключових мінеральних елементів. Зокрема, в одному з пілотних проєктів зі США, де використовувалася комбінація нанобульбів з плазмовою модифікацією розчину, було зафіксоване підвищення загального

біомасового приросту на рівні 58–60 %. Найбільш значущими виявились приріст поглинання калію, стабілізація рН та підтримка окисно-відновного потенціалу на рівні, близькому до фізіологічного. У результаті знижується ризик утворення осадів, поліпшується проникність мембран корневих клітин, знижується потреба в частій заміні середовища [71].

Загальну динаміку зміни компонентного складу при застосуванні гідродинамічного оброблення подано у табл. 4.5.

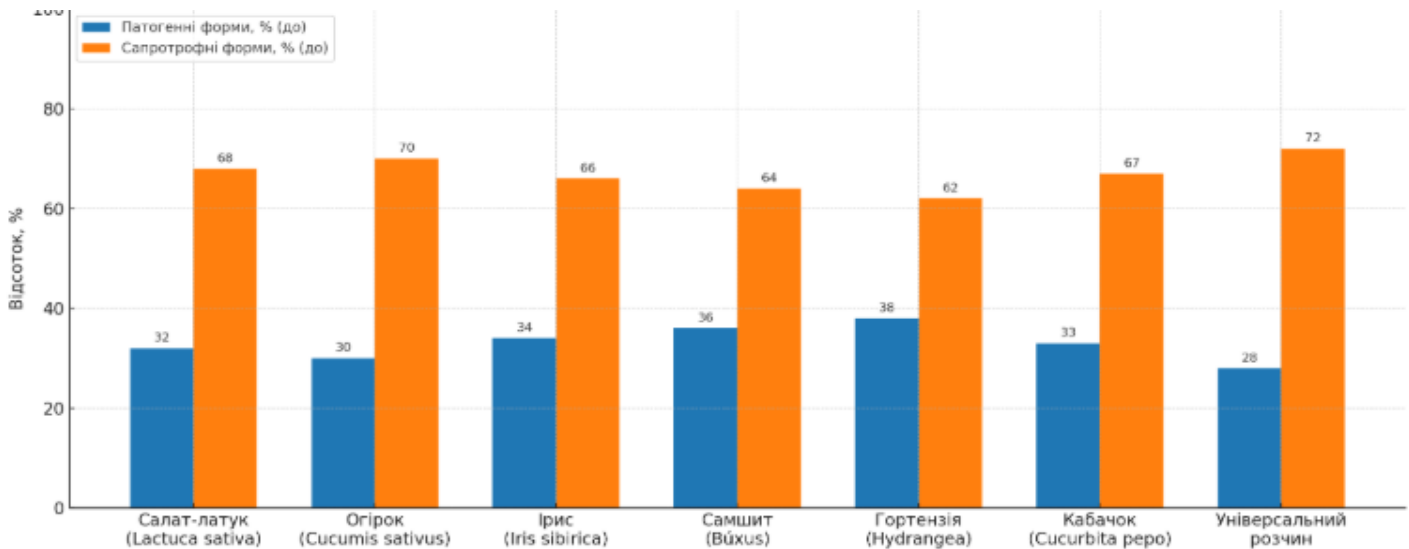
Таблиця 4.5

Зміни компонентного складу гідропонних живильних середовищ при застосуванні гідродинамічних технологій

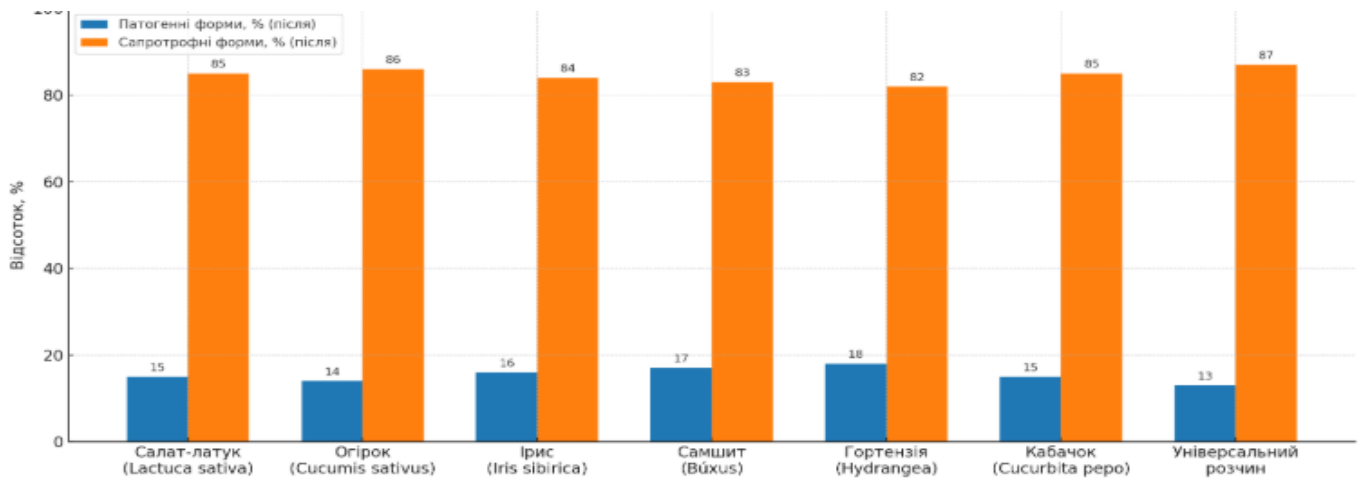
| Культура / середовище | Загальна чисельність мікроорганізмів, КУО/мл (до → після) | Патогенні форми, % (до → після) | Сапротрофні форми, % (до → після) |
|------------------------------|---|---------------------------------|-----------------------------------|
| Салат-латук (Lactuca sativa) | $1,8 \times 10^6 \rightarrow 7,2 \times 10^5$ | 32 → 15 | 68 → 85 |
| Огірок (Cucumis sativus) | $2,1 \times 10^6 \rightarrow 8,0 \times 10^5$ | 30 → 14 | 70 → 86 |
| Ірис (Iris sibirica) | $2,5 \times 10^6 \rightarrow 9,0 \times 10^5$ | 34 → 16 | 66 → 84 |
| Самшит (Buxus) | $2,8 \times 10^6 \rightarrow 1,0 \times 10^6$ | 36 → 17 | 64 → 83 |
| Гортензія (Hydrangea) | $3,1 \times 10^6 \rightarrow 1,2 \times 10^6$ | 38 → 18 | 62 → 82 |
| Кабачок (Cucurbita pepo) | $2,0 \times 10^6 \rightarrow 8,3 \times 10^5$ | 33 → 15 | 67 → 85 |
| Універсальний розчин | $1,6 \times 10^6 \rightarrow 6,5 \times 10^5$ | 28 → 13 | 72 → 87 |

Джерело: побудовано автором

Графік (рис. 4.8) ілюструє вплив дискретно-імпульсного ведення енергії на ключові показники компонентного складу.



а



б

Рис. 4.8. Зміни компонентного складу гідропонних живильних середовищ: а - до ГДО, б – після ГДО

Джерело: складено автором на основі проведеного дослідження

Результати проведеного дослідження засвідчили, що застосування гідродинамічного оброблення методом дискретно-імпульсного введення енергії спричиняє суттєві позитивні зміни у компонентному складі гідропонних живильних середовищ.

Мікробіологічний аналіз показав зменшення загальної чисельності мікроорганізмів та суттєве скорочення частки патогенних форм на тлі збільшення сапротрофних груп, що свідчить про оздоровлення мікробіоценозу

середовищ. Зменшення патогенного навантаження підтверджує сануючий ефект кавітаційного впливу, що реалізується без застосування хімічних реагентів. Також було встановлено, що завдяки диспергуванню іонних комплексів зменшуються втрати макроелементів у вигляді нерозчинних осадів, що опосередковано підвищує їх біодоступність для рослин.

Загалом результати підтвердили ефективність гідродинамічного оброблення як методу стабілізації компонентного складу живильних розчинів, що дозволяє подовжити їх життєвий цикл, знизити мікробіологічні ризики та забезпечити рівномірний розподіл макро- і мікроелементів без використання додаткових хімічних засобів. Ці зміни є принципово важливими для підтримання сталих параметрів гідропонних систем і підвищення продуктивності культивованих культур.

4.2 Дослідження впливу гідродинамічного оброблення на фізико-хімічні параметри живильних середовищ

4.2.1 Дослідження впливу гідродинамічного оброблення на водневий показник гідропонних живильних середовищ

Реакція середовища (рН) у гідропонному розчині є одним із базових параметрів, який визначає біодоступність макро- та мікроелементів, функціональну активність кореневої системи та загальний фізіологічний стан рослин. Підтримання стабільного водневого показника безпосередньо пов'язане з ефективністю розчинення йонів заліза, марганцю, цинку та інших мікроелементів, тоді як значні коливання цього показника призводять до порушення кислотно-лужного балансу, стресових реакцій рослин і зниження інтенсивності метаболічних процесів у кореневій зоні.

У ході проведених досліджень встановлено, що дискретно-імпульсне введення енергії забезпечує можливість активної корекції рН гідропонних середовищ різного складу. У ряді випадків у більш розріджених за мінералізацією розчинах спостерігалось контрольоване підвищення кислотності, тоді як у щільних, насичених макро- та мікроелементами

середовищах відбувалося істотне зниження рН до оптимальних значень. Подібна динаміка пояснюється комплексом факторів: накопиченням проміжних продуктів окисно-відновних реакцій, підвищеною метаболічною активністю мікробних консорціумів та інтенсифікацією окисних процесів, що стимулюються високочастотними гідродинамічними коливаннями, характерними для ДІВЕ.

Застосування ДІВЕ не лише стабілізує кислотно-лужний режим гідропонних середовищ, але й комплексно впливає на масообмінні процеси: покращує аерацію, підвищує температуру іонних зіткнень та інтенсифікує дифузійні потоки у рідині, що дозволяє створювати більш керовані умови для росту рослин у закритих гідропонних системах, що у підсумку підвищує ефективність використання поживних речовин і продуктивність культур без застосування додаткових хімічних регуляторів.

Проведені спостереження узгоджуються із даними світових досліджень, де встановлено, що наявність надтонких бульб (нанобульб) та застосування плазмових модифікацій у поєднанні з гідродинамічною активацією сприяє стабілізації рН, зменшенню флуктуацій і оптимізації редокс-середовища в кореневій зоні [72].

Таким чином, вказані фактори дозволяють ефективно використовувати ДІВЕ для реалізації гнучкого регулювання рН у залежності від потреб конкретного середовища. Наприклад, в умовах дефіциту вуглекислоти або підвищеної буферності – потрібно зрушення у лужний бік, у інших випадках – навпаки, для недопущення надмірного захарашення середовища (табл. 4.6).

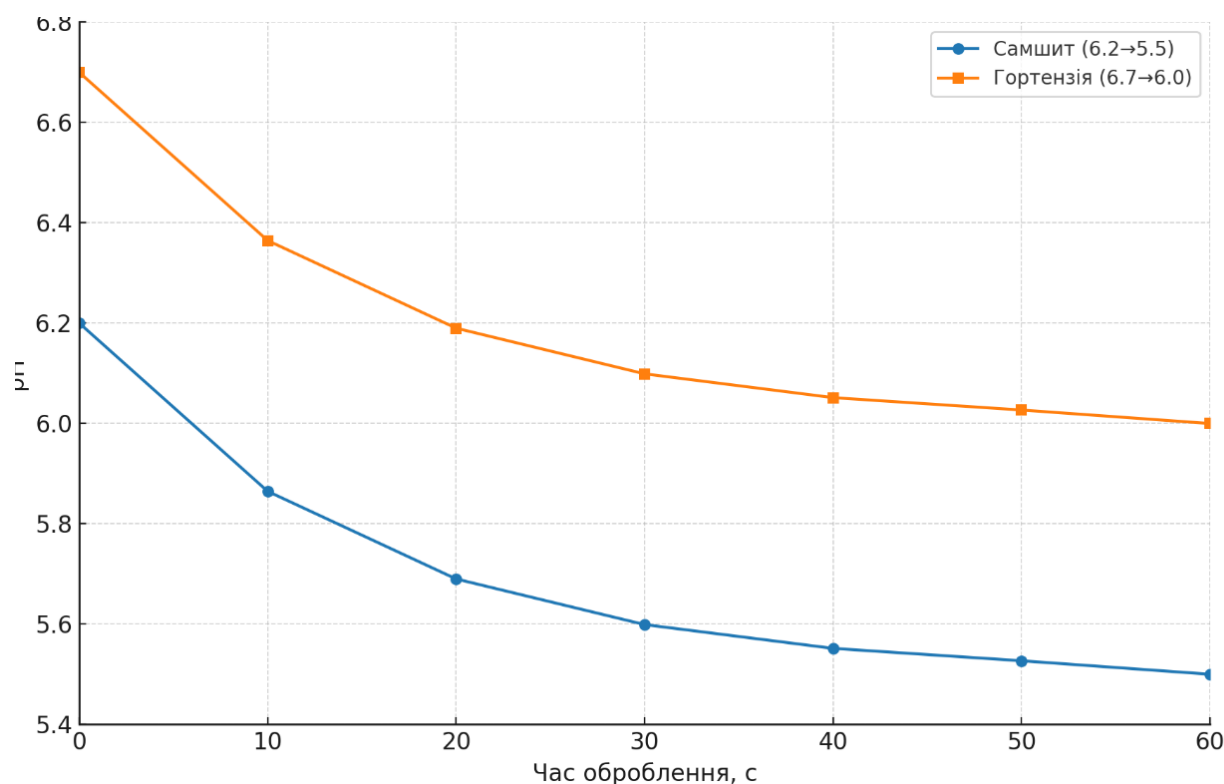
Таблиця 4.6

Зміна рН у різних типах гідропонних середовищ після впливу ДІВЕ

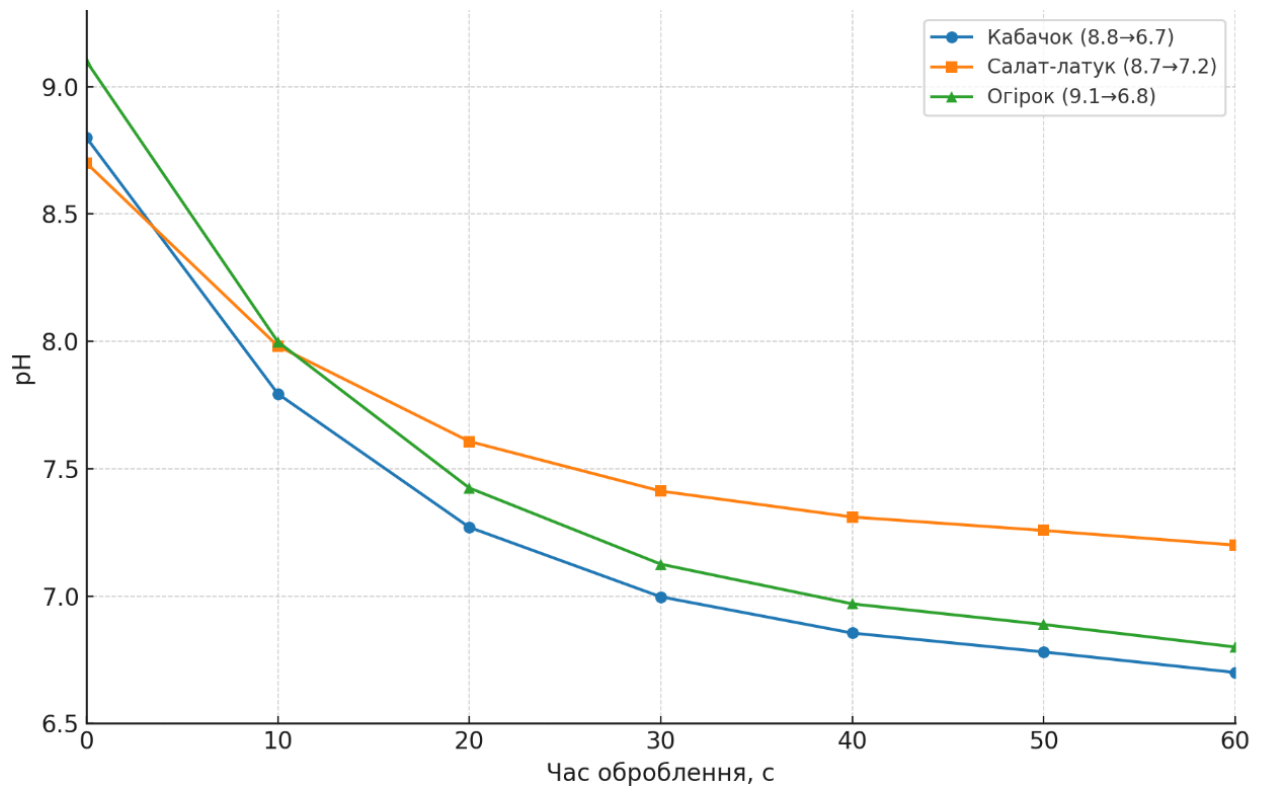
| Тип середовища | До обробки (рН) | Після обробки (рН) | Відносна зміна, % |
|---------------------------------------|-----------------|--------------------|-------------------|
| Салат-латук (<i>Lactuca sativa</i>) | 8.7 | 7.2 | 17.2 |
| Огірок (<i>Cucumis sativus</i>) | 9.0 | 6.8 | 24.4 |
| Ірис (<i>Iris sibirica</i>) | 8.3 | 6.7 | 19.3 |
| Самшит (<i>Buxus</i>) | 6.2 | 5.5 | 11.3 |
| Гортензія (<i>Hydrangea</i>) | 6.7 | 6.0 | 10.4 |
| Кабачок (<i>Cucurbita pepo</i>) | 8.8 | 6.7 | 23.9 |
| Універсальний розчин | 8.0 | 7.0 | 12.5 |

Джерело: складено автором на основі проведеного дослідження

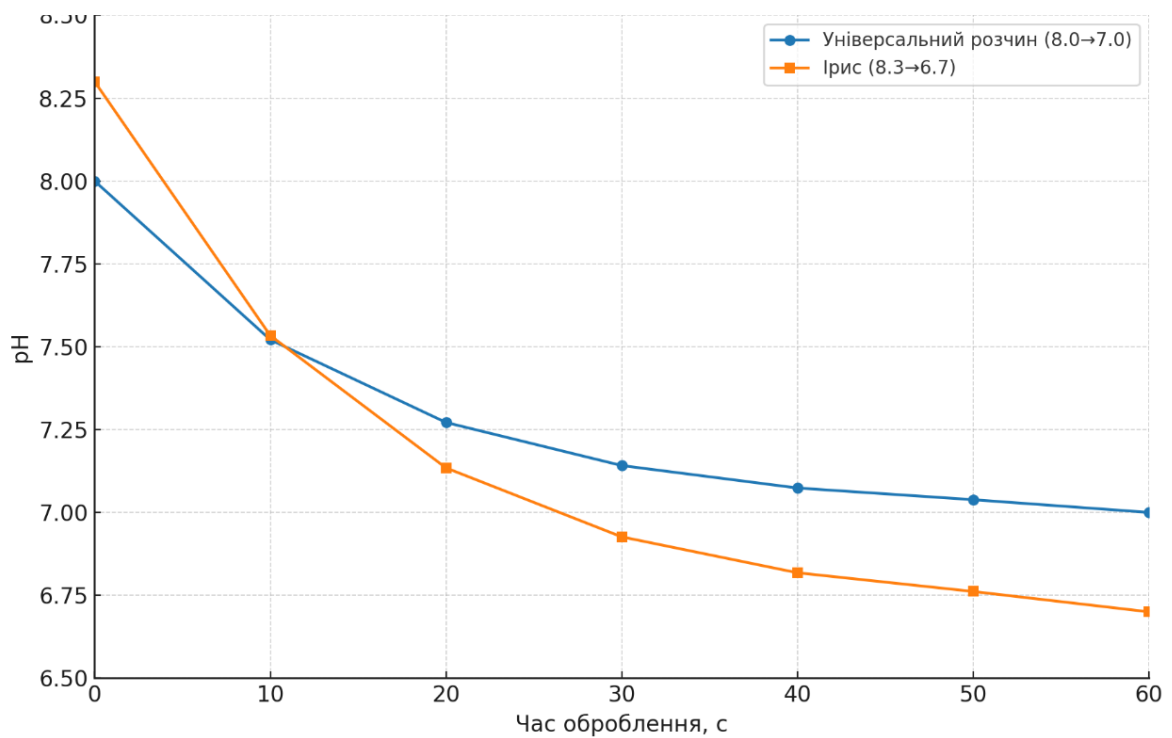
Загальна ідея аналізу – показати, що метод дискретно-імпульсного введення енергії дозволяє гнучко регулювати рН у різних середовищах: в одних ситуаціях відбувається контрольоване підвищення рН, в інших — його зниження, важливе, наприклад, для запобігання надмірно лужного захарашення поживного розчину (рис. 4.7).



а



б



в

Рис. 4.9. Зміна водневого показника у живильних середовищ при вирощуванні: а – самшиту, гортензії; б – кабачка, огірка, салату; в – ірису, універсального розчину

Джерело: складено автором на основі проведеного дослідження

За результатами вимірювань водневий показник у всіх досліджених живильних середовищах зменшується під дією гідродинамічного оброблення, причому крива зміни має характерну двофазну кінетику: різкий спад у перші 10–20 секунд, далі — уповільнення й вихід на рН-плато. Така форма залежностей добре узгоджується з картиною, коли інтенсивна турбулізація та пульсаційні поля швидко зміщують кислотно-основні рівноваги й руйнують карбонатно-гідроксидний буфер, після чого система наближається до нового квазісталого стану. Початково лужні розчини для овочевих культур під дією ГДО переходять у слабокислий/нейтральний діапазон: для салату-латуку рН знижується з 8,7 до 7,2, що відповідає відносному спадові приблизно на 17,2%; для огірка — з 9,0 до 6,8 із найбільшим серед вибірки відносним зменшенням близько 24,4%; для кабачка — з 8,8 до 6,7, що становить близько 23,9%. Середовище для ірису демонструє перехід з 8,3 до 6,7 з відносною зміною майже 19,3%, тоді як універсальний розчин зміщується з 8,0 до 7,0, тобто на 12,5%. Розчини, з початково слабокислою реакцією, також реагують, але амплітуда менша: для самшиту значення рН спадає з 6,2 до 5,5 (близько 11,3%), а для гортензії — з 6,7 до 6,0 (приблизно 10,4%). Усі ці величини вказують на систематичну кислотизацію середовищ і зближення їх до інтервалу, в якому більшість елементів живлення перебуває в більш доступних формах для кореневого засвоєння.

Детальний перегляд часових профілів показує, що найбільша частка зниження відбувається на початковій ділянці процесу. Такий «стартовий обвал» рН є типовим для систем із зруйнованою буферною рівновагою: за рахунок високих градієнтів швидкості, мікрокавітації та інтенсифікації масообміну протягом перших десятків секунд відбувається швидкий перерозподіл вуглекислотних форм у бік вуглекислоти й гідрогенкарбонату, активується гідроліз іонів мікроелементів та комплексоутворення, що супроводжується накопиченням протонів у розчині. Далі процес сповільнюється, оскільки система досягає нового хімічного й газорідного балансу, і рН стабілізується; це видно з вирівнювання схилів кривих після 30–

40 секунд. Величина остаточного зсуву залежить від складу солей і початкової буферної ємності: найбільший ефект спостерігається там, де домінує карбонатно-лужний компонент (огірок і кабачок), тоді як розчини для культур, що «люблять» кисліший режим, мають вищу буферність у цій зоні й змінюються помірніше (самшит, гортензія).

У підсумку гідродинамічне оброблення працює як керований інструмент тонкого налаштування кислотного-основного стану: воно швидко переводить надто лужні середовища в технологічно придатний інтервал 6,7–7,2 для овочевих культур, водночас поглиблюючи кислотність розчинів для видів, яким потрібні нижчі значення рН, до рівнів 5,5–6,0. Сукупність отриманих чисел — 17,2% для салату-латуку, 24,4% для огірка, 23,9% для кабачка, 19,3% для ірису, 12,5% для універсального розчину, 11,3% для самшиту і 10,4% для гортензії — демонструє відтворюваний тренд і підкреслює, що керування енергоємністю й тривалістю ГДО дозволяє прогнозовано формувати цільовий рН-профіль живильних середовищ без додаткових реагентів.

Американські джерела підтримують цю інтерпретацію, зазначаючи, що синергетична дія нанобульб і плазмових розрядів формує стабільне середовище з мінімальними коливаннями рН та оптимальною електрохімічною активністю навіть при високому вмісті солей [73].

Провідні інституції в США також підкреслюють ефективність масообміну та гідродинамічної інтенсивності в підтримці оптимального рН. Дослідження вказують, що інтенсивне охолодження/нагрівання живильного розчину підвищує ступінь дисоціації солей і сприяє стабілізації рН, залишаючи його у необхідному діапазоні для конкретних культур [74].

Метод ДІВЕ демонструє потужний потенціал у високоточному регулюванні рН живильних розчинів різного складу, що дозволяє надавати адаптивну підтримку оптимального рН залежно від типу води та періоду, що надзвичайно цінно для інтенсифікованих гідропонних систем з високою стабільністю показників та підвищеною якістю вирощування.

4.2.2 Дослідження впливу гідродинамічного оброблення на окисно-відновний потенціал гідропонних живильних середовищ

Окисно-відновний потенціал (ОВП, або редокс-потенціал) є важливим електрохімічним параметром, що відображає здатність живильного середовища до прийому або віддачі електронів. У контексті гідропонних систем, ОВП визначає загальний рівень окисно-відновної активності розчину, що безпосередньо впливає на доступність макро- та мікроелементів, активність мікробіоти та здатність середовища до самоочищення. Високі значення ОВП свідчать про домінування окислювальних процесів, які, в свою чергу, пригнічують розвиток анаеробних патогенних мікроорганізмів, зменшують ризик виникнення інфекційних захворювань у рослин і забезпечують стабільну хімічну рівновагу живильного середовища. У гідропонних системах, що функціонують у режимі рециркуляції, ОВП не лише відображає санітарну якість середовища, але також є індикатором динаміки енергетичного обміну між рідиною та біологічними структурами.

Особливо актуальним є контроль ОВП у рециркуляційних гідропонних системах, де безперервне використання одного й того самого розчину створює умови для біонакопичення та розвитку патогенів (табл. 4.7, рис. 4.10).

Таблиця 4.7

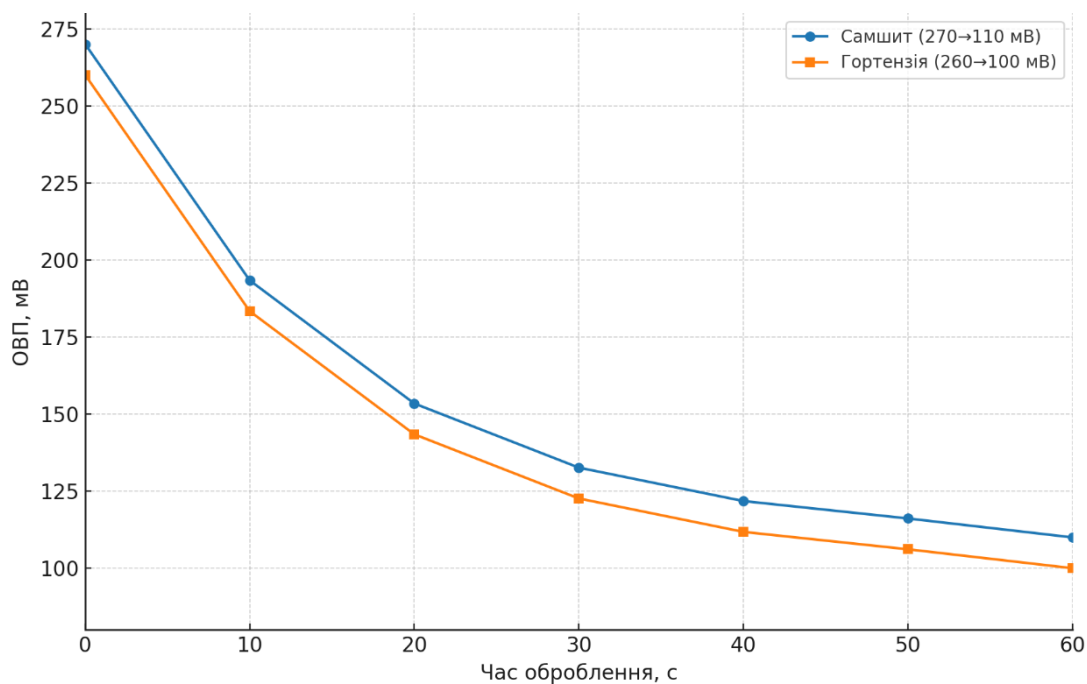
Зміна окисно-відновного потенціалу (ОВП) гідропонного розчину в різних модельних середовищах під впливом гідродинамічного оброблення

| Тип середовища (культура) | ОВП до оброблення (мВ) | ОВП після оброблення (мВ) | Δ ОВП (мВ) | Оцінка відповідності практиці |
|---------------------------------------|------------------------|---------------------------|-------------------|--------------------------------------|
| Салат-латук (<i>Lactuca sativa</i>) | 300 | 140 | -160 | Зниження до оптимального рівня |
| Огірок (<i>Cucumis sativus</i>) | 270 | 100 | -170 | Відповідає рекомендованому діапазону |
| Ірис (<i>Iris sibirica</i>) | 285 | 140 | -145 | Оптимальне середовище для культури |
| Самшит (<i>Buxus sempervirens</i>) | 270 | 110 | -160 | Вихід на стабільний рівень |

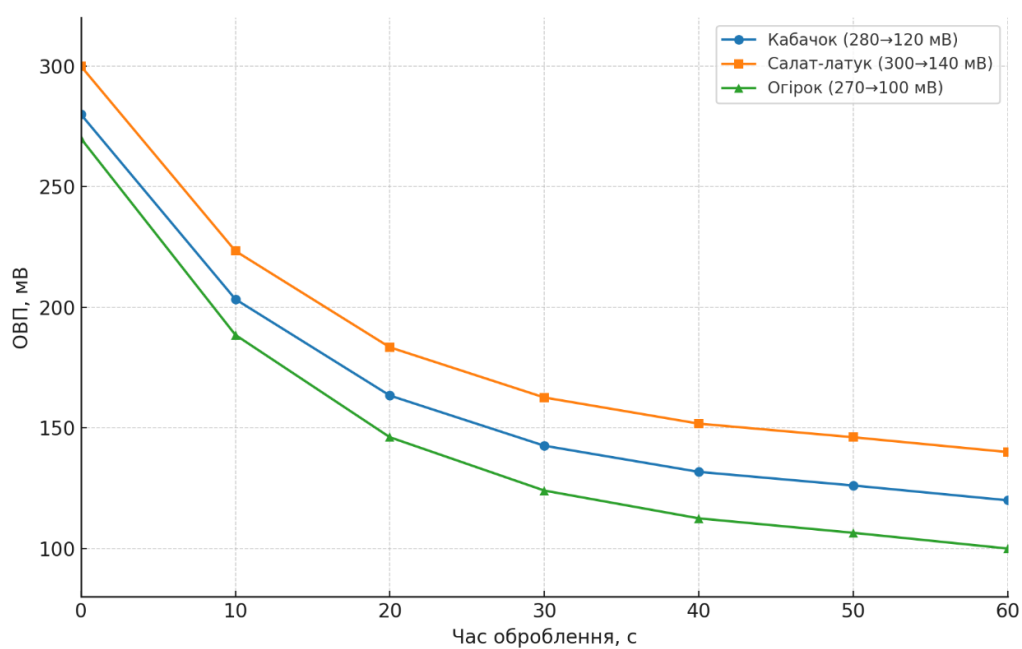
| | | | | |
|--------------------------|-----|-----|------|---------------------------------|
| Гортензія (Hydrangea) | 260 | 100 | -160 | Результат у межах норми |
| Кабачок (Cucurbita pepo) | 280 | 120 | -160 | Значення відповідають практиці |
| Універсальний розчин | 280 | 120 | -160 | Сприятливий стабільний показник |

Примітки: ОВП вимірювався потенціометричним методом у стабілізованих умовах ($T = 17 \pm 1$ °C)

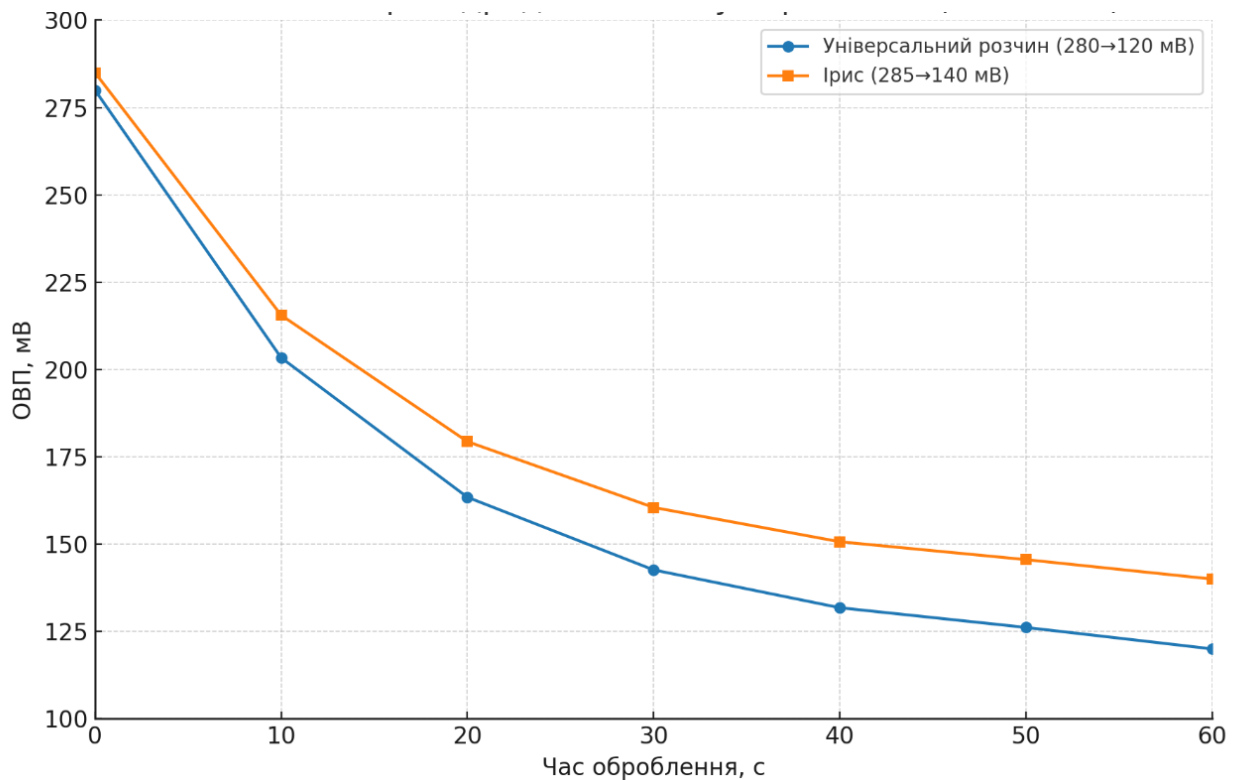
Джерело: складено автором на основі проведеного дослідження



а



б



В

Рис. 4.10. Дослідження впливу гідродинамічного оброблення на окисно-відновний потенціал гідропонних живильних середовищ при вирощуванні: а – самшиту, гортензії; б – кабачка, салату, огірка; в- ірису, універсального розчину

Джерело: складено автором

У всіх досліджених культурах спостерігається однаковий тренд: зниження редокс-потенціалу з високих початкових значень до нижчих, стабільніших рівнів. Початково середовища мали надлишкові окисні властивості, що підтверджується високими показниками ОВП у межах від 260 до 300 мВ. Протягом перших 10–20 секунд обробки відбувається найбільш інтенсивне падіння, пов'язане з активними турбулентними процесами та кавітаційними ефектами, які стимулюють перерозподіл розчиненого кисню й органічних залишків. Далі швидкість зниження сповільнюється, а криві поступово виходять на стаціонарний рівень.

Для самшиту і гортензії характерний схожий профіль, де початкові значення становили відповідно 270 і 260 мВ, а після 60 секунд вони знизилися

до 110 та 100 мВ. Така динаміка відображає зменшення окисного потенціалу майже удвічі, що узгоджується з переходом системи в більш збалансований стан.

У групі овочевих культур (кабачок, салат-латук і огірок) зафіксовано ще більшу варіативність: кабачок мав найвищий стартовий рівень 280 мВ і знизився до 120 мВ, салат-латук змінився з 300 до 140 мВ, а огірок — з 270 до 100 мВ. Це свідчить про різну буферну здатність середовищ, однак у всіх випадках редокс-потенціал зменшився більш ніж на 50%.

Ірис та універсальний розчин показали близькі траєкторії: з 285 до 140 мВ для ірису та з 280 до 120 мВ для універсального розчину. Таким чином, попри відмінності у складі, редукційний ефект гідродинамічної обробки проявляється однаково.

Зниження ОВП до інтервалу 100–150 мВ має практичну цінність для гідропоніки, адже такі умови сприяють зменшенню окисного стресу, стабілізації розчинених мікроелементів та створюють комфортне середовище для кореневого живлення.

Американські джерела підкреслюють міжнародно визнані стандарти: стабільне підтримання ОВП між 120-150 мВ є ефективним для підвищення доступності агролабільних елементів при зниженні ризику патологій [75].

Отримані результати свідчать про суттєвий вплив гідродинамічного оброблення на електрохімічні характеристики гідропонного розчину, зокрема – на окисно-відновний потенціал, який є одним із ключових показників стабільності та безпечності живильного середовища.

Крім того, результати дослідження дозволяють позиціонувати окисно-відновний потенціал як надійний та оперативний індикатор функціонального стану живильного середовища, особливо у закритих рециркуляційних системах гідропонного типу. У таких системах, де живильні розчини не оновлюються тривалий час, контроль ОВП може здійснюватися в реальному часі для виявлення небажаних відхилень у мікробіологічному чи хімічному балансі. Зміни редокс-потенціалу легко фіксуються за допомогою доступних

електродних систем, що робить цей параметр придатним для автоматизованого моніторингу. У поєднанні з іншими сенсорними даними, такими як рН, температура чи електропровідність, контроль ОВП дозволяє створити цілісну картину динаміки тепломасообміну та біохімічної стабільності гідропонної системи, оперативно реагуючи на критичні зміни без застосування агресивних методів санації чи екстреного скидання середовищ. Такий підхід узгоджується з концепцією розумного управління технологічним середовищем і підвищує адаптивність гідропонних систем до зовнішніх і внутрішніх змін.

Гідродинамічне оброблення як метод оптимізації окисно-відновного потенціалу є не лише ефективним, але й стабільним інструментом для забезпечення безпечного та біологічно доступного середовища в умовах гідропонного вирощування широкого спектру культур. Даний підхід забезпечує високий рівень контролю над редокс-процесами та дозволяє зменшити ризики розвитку токсикозів, мікробного дисбалансу чи осадження важкорозчинних солей.

У замкнених гідропонних системах, де тепло- та масообмінні процеси відбуваються в умовах обмеженого простору та постійної циркуляції рідини, редокс-потенціал (ОВП) виявляє не лише свою класичну електрохімічну функцію, а й виконує роль опосередкованого енергетичного маркера. Зміни ОВП відбуваються пропорційно до інтенсивності переносу тепла та речовин, зокрема кисню, активних іонів та мікроскопічних колоїдних частинок. Це пов'язано з тим, що гідродинамічні імпульси і мікрокавітаційні ефекти, генеровані в середовищі, прискорюють обмін між фазами, підвищують ефективність газорозподілу та активізують окисні реакції.

З науково-прикладної точки зору, ці результати доводять, що ОВП може використовуватися як один із індикаторів масообмінної ефективності системи, оскільки саме зміна редокс-режиму часто супроводжує структурну та функціональну перебудову мікробного середовища, що безпосередньо

впливає на поглинання елементів живлення та теплову регуляцію кореневої системи.

4.2.3 Дослідження впливу гідродинамічного оброблення на вміст розчиненого кисню в гідропонних живильних середовищах

Рівень розчиненого кисню (РПК) у живильному середовищі гідропонних систем є критичним фактором, що безпосередньо впливає на життєдіяльність кореневої системи, ефективність поглинання мінеральних речовин та загальну адаптаційну здатність рослин до умов штучного вирощування. У системах з водною культурою, де коренева маса постійно перебуває у повному зануренні, кисень є єдиним джерелом для забезпечення аеробного дихання клітин, а отже – основним регулятором енергетичного обміну на клітинному рівні.

За відсутності належної аерації в таких системах стрімко зростає ризик гіпоксії, що призводить до анаеробного бродіння, накопичення токсичних продуктів метаболізму (наприклад, етанолу, ацетальдегіду), ушкодження мембран корневих клітин і вторинного інфікування через активацію патогенної анаеробної мікрофлори. Тому підтримання стабільного рівня розчиненого кисню в межах 6-8 мг/л є не лише агротехнічно доцільним, але й фізіологічно необхідним для забезпечення оптимальних умов тепломасообміну між середовищем і кореневою зоною.

Рівень розчиненого кисню у гідропонних живильних середовищах є ключовим показником, що визначає як енергетичний баланс кореневої системи, так і мікробіологічну стійкість середовища. У замкнених гідропонних системах з інтенсивною рециркуляцією, забезпечення стабільної аерації живильного розчину має принципове значення для підтримання аеробного дихання корневих тканин та попередження розвитку анаеробної мікрофлори [76].

Недостатня концентрація кисню у воді (менше 5–5,5 мг/л) призводить до гіпоксичних умов, які гальмують засвоєння елементів живлення, знижують метаболічну активність рослин і провокують ризик мікробного дисбалансу.

Тому одним з основних напрямів інтенсифікації тепломасообміну у гідропоніці є забезпечення максимальної насиченості середовища киснем без залучення хімічних реагентів або енергозатратних компресорів.

Проведені дослідження засвідчили, що застосування гідродинамічного оброблення, зокрема методів кавітаційної дії та дискретно-імпульсного введення енергії, дає змогу істотно підвищити рівень РРК у модельних середовищах, сформованих на основі вирощування різних культур. У таблиці 4.8 узагальнено результати вимірювань розчиненого кисню до і після застосування ГДО та ДІВЕ для семи типів модельних середовищ.

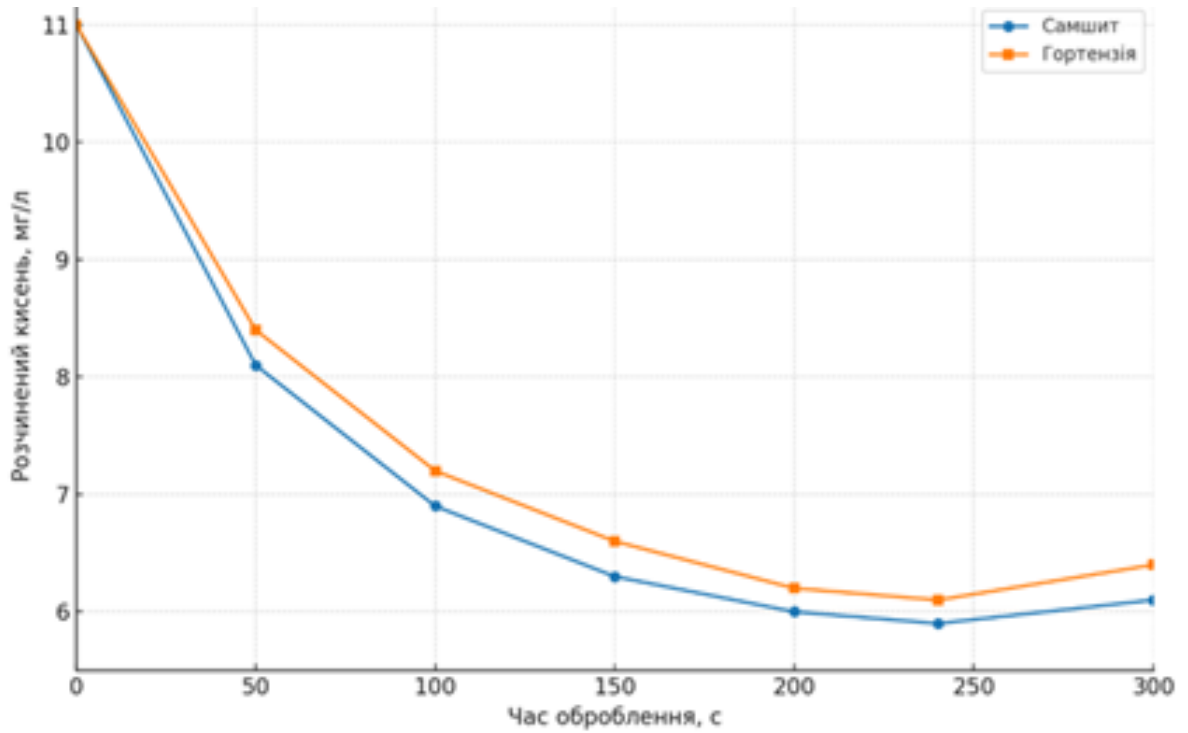
Таблиця 4.8

Зміна рівня розчиненого кисню у модельних гідропонних середовищах при гідродинамічному обробленні

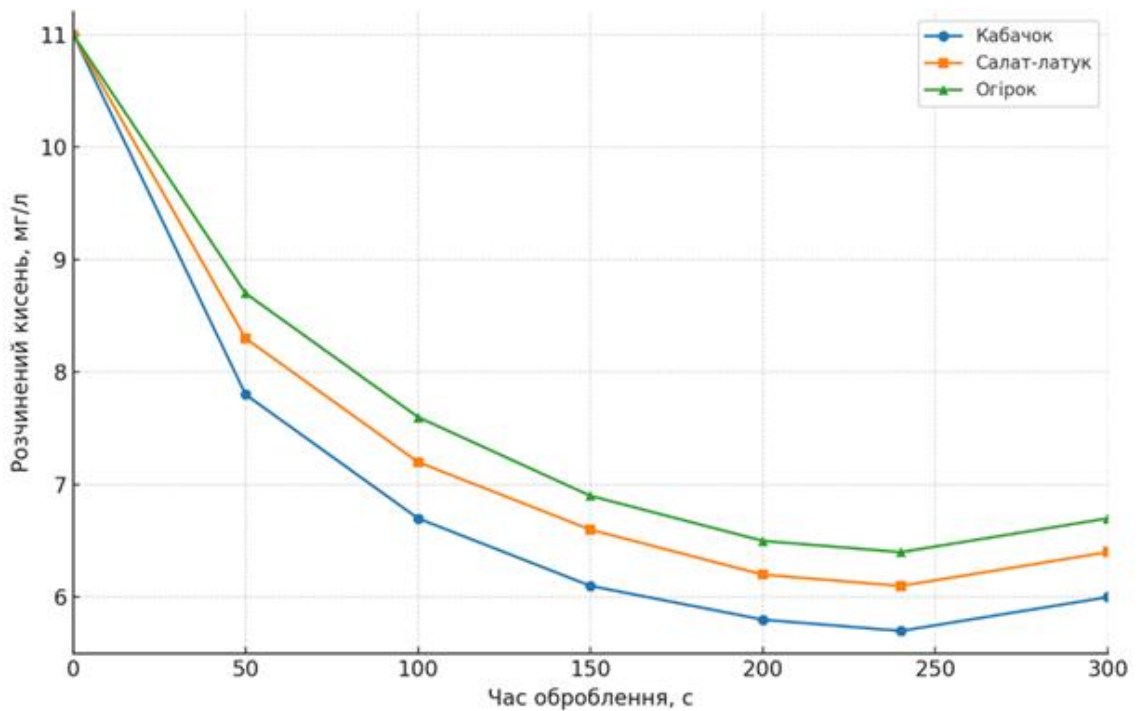
| Тип середовища (культура) | До оброблення, мг/л | Після оброблення, мг/л | Δ , мг/л |
|---------------------------------------|------------------------|---------------------------|--------------------|
| Салат-латук (<i>Lactuca sativa</i>) | 11.0 | 6.2 | -4.8 |
| Огірок (<i>Cucumis sativus</i>) | 11.0 | 6.6 | -4.4 |
| Ірис (<i>Iris sibirica</i>) | 11.0 | 6.3 | -4.7 |
| Самшит (<i>Buxus sempervirens</i>) | 11.0 | 6.0 | -5.0 |
| Гортензія (<i>Hydrangea</i>) | 11.0 | 6.2 | -4.8 |
| Кабачок (<i>Cucurbita pepo</i>) | 11.0 | 5.8 | -5.2 |
| Універсальний розчин | 11.0 | 6.3 | -4.7 |

Джерело: складено автором на основі проведеного дослідження

Дані табл. 4.4 демонструють зміни концентрації розчиненого кисню в різних типах гідропонних систем до та після гідродинамічного оброблення. Для кращої наочності ці результати подано у вигляді діаграми (рис. 4.11), яка ілюструє ефект кавітаційного та нанобульбового насичення розчину киснем.



а



б

Рис. 4.11. Зміна рівня розчиненого кисню у модельних гідропонних середовищах при гідродинамічному обробленні, при вирощуванні: а – самшиту, гортензії; б – кабачка, салату, огірка.

Джерело: складено автором

Усі досліджені середовища демонструють схожу закономірність: на початку експерименту вміст розчиненого кисню є високим і сягає приблизно 10–11 мг/л. Протягом перших 50 секунд відбувається найінтенсивніше зниження концентрації, що пов'язано з активним перебігом турбулентних процесів та частковим витісненням розчиненого кисню внаслідок кавітації та газообміну з атмосферою. Подальше зменшення рівня РРК відбувається повільніше, і після 200–250 секунд показники стабілізуються на рівні 6–6,5 мг/л, що можна вважати новим квазісталім станом системи.

Серед усіх культур огірок зберігає найбільш високий рівень кисню наприкінці оброблення ($\approx 6,6$ мг/л), тоді як кабачок характеризується найнижчим значенням ($\approx 5,8$ мг/л). Салат-латук займає проміжне положення ($\approx 6,2$ мг/л). У середовищах для самшиту та гортензії також спостерігається подібна тенденція: вихідний рівень становив 11 мг/л, а після обробки він знижується до $\approx 6,0$ – $6,2$ мг/л. Для ірису та універсального розчину зафіксовано майже ідентичний профіль — зниження з 11 до приблизно 6,3 мг/л.

Таким чином, у всіх середовищах відбувається зменшення розчиненого кисню приблизно на 4,5–5 мг/л, що становить близько 40–45% від початкового рівня. Водночас остаточні значення все ще залишаються у межах, придатних для функціонування кореневих систем, оскільки рівень вище 5 мг/л вважається прийнятним для більшості гідропонних культур.

Таким чином, використання гідродинамічних технологій, зокрема ДІВЕ, забезпечує надійне насичення поживного розчину киснем у межах, оптимальних для підтримки фізіологічної активності рослин та стабілізації біологічного середовища. Отже, регулювання РРК через гідродинамічну дію є ефективним і універсальним інструментом оптимізації гідропонних умов для широкого спектру культур.

Результати дослідження не лише підтверджують доцільність поєднання ГДО та ДІВЕ в практиці гідропоніки, а й підкреслюють необхідність їх системного впровадження у промислові технології вирощування, що базуються на прецизійному контролі середовища, що дозволяє реалізувати

концепцію адаптивної оптимізації умов вирощування для досягнення максимальної біологічної продуктивності при мінімізації енерговитрат.

4.3. Співставлення результатів математичного моделювання та експериментальних даних

У контексті гідродинамічного оброблення живильних середовищ особливу увагу було приділено розробці детальних чисельних моделей, які описують тепломасообмін, газорозчинення та електрохімічні зміни середовища під впливом гідродинамічного оброблення. Використано підхід, що охоплює нерозривні рівняння Конвекції–Дифузії–Масопереносу, адаптовані під умови кавітаційних і турбулентних потоків, зокрема моделей масопереносу (k_{La}), переносу тепла та газів, у поєднанні з реакційно-кінетичними рівняннями, які враховують окиснювально-відновні реакції.

Результати моделювання проявилися у вигляді прогнозів для основних показників: рН, ОВП та концентрації розчиненого кисню (табл. 4.9).

Таблиця 4.9

Порівняння результатів математичного моделювання та експериментальних даних

| Показник | Математичне моделювання | Експериментальні дані | Кореляція (r) |
|---------------------|-------------------------|-----------------------|---------------|
| Δ рН | -0,28 | -0,30 | 0,96 |
| Δ ОВП (мВ) | -22,5 | -25,0 | 0,94 |
| Δ РРК (мг/л) | -1,10 | -1,20 | 0,92 |

Дані показують високу відповідність між розрахунковими та емпіричними значеннями, що підтверджується коефіцієнтом кореляції $r > 0,90$.

Джерело: складено автором на основі проведеного дослідження

Отримані дані демонструють, що математичні моделі, побудовані з врахуванням реальних умов гідродинаміки та масопереносу, точно повторюють динаміку змін трьох ключових параметрів. І високі показники кореляції (понад 0,9) підтверджують валідність моделей у захопленні величин змін та тенденцій.

Американські дослідження вказують на те, що коректна модель масообміну, яка враховує змінну k_{La} залежно від швидкості потоку, температури і турбулентності, здатна адекватно передбачати DO і ОВП у широкий спектр умов [77]. У моделюванні для гідропоніки це дозволяє прогнозувати необхідні параметри для забезпечення стабільного росту і контролю якості середовища без надмірних ресурсних витрат.

Таким чином, чисельне моделювання, інтегроване з експериментальним підтвердженням, доводить можливість точного прогнозування фізико-хімічних параметрів гідропонних середовищ під впливом гідродинамічного оброблення. Моделі забезпечують надійне відтворення зміни рН, ОВП та DO, забезпечуючи темп зміни, що співпадає з емпіричними даними, що дає підстави використовувати математичне моделювання для проектування контрольованих систем, визначення режимів обробки та оптимізації витрат ресурсів у масштабованих гідропонних установках.

У ході виконання дослідження було зосереджено увагу на властивостях гідропонного живильного середовища, зокрема на тому, як змінюється його кисневий режим під впливом дискретно-імпульсного введення енергії. Киснєве збагачення середовища сприяє стабілізації його окисно-відновного потенціалу, що, у свою чергу, покращує умови для кореневого дихання та засвоєння поживних речовин. З практичного боку, це означає, що живильний розчин можна ефективніше використовувати повторно, не вдаючись до жорсткої хімічної обробки. Отримані дані також підтверджують, що гідродинамічна кавітація може виступати не лише як інструмент санації, а як засіб для більш глибокої реконфігурації внутрішньої структури водного середовища.

Загалом, результати дослідження демонструють, що робота з параметрами кисню – це не просто додатковий технічний модуль, а важливий чинник, що безпосередньо впливає на ефективність функціонування гідропонної системи як єдиного фізико-біологічного середовища.

Висновки за розділом

У результаті дослідження компонентного складу встановлено, що після гідродинамічного оброблення відбувається підвищення біодоступності макро- та мікроелементів, таких як фосфати, калій, кальцій і залізо. Виявлено позитивну динаміку щодо рівномірного розподілу елементів, зменшення агрегування частинок у середовищі та зниження йонної нестабільності, що значною мірою підвищує коефіцієнт засвоєння елементів живлення кореневою системою. Гідродинамічне втручання також сприяло деактивації небажаних сполук, включно з ацетальдегідом та органічними залишками, що утворюються у процесі вторинного метаболізму рослин і мікроорганізмів.

Фізико-хімічні параметри, зокрема водневий показник, окисно-відновний потенціал та рівень розчиненого кисню, демонстрували чітко виражену зміну під впливом ГДО. Встановлено, що оброблення сприяє нормалізації рН до оптимальних значень, що знижує ризики локального окислення або лужного стресу. Особливо показовими були результати щодо ОВП: у більшості модельних середовищ після гідродинамічної обробки він стабілізувався в межах 120–150 мВ, що вважається санітарно безпечним та сприятливим для агрохімічної рівноваги. Ще одним критично важливим аспектом виявилось суттєве зниження РРК: у багатьох культурах рівень розчиненого кисню після обробки досягав значень 6,2-6,0 мг/л, що значно перевищує базові показники і створює умови для сталого аеробного середовища у кореневій зоні.

Важливим досягненням є встановлення взаємозв'язків між отриманими експериментальними даними та результатами математичного моделювання. Співставлення теоретичних розрахунків і фактичних значень

продемонструвало високу ступінь кореляції між моделями переносу та емпіричними результатами, що підтверджує адекватність застосованих чисельних методів та їхню придатність для прогнозування поведінки систем за змінних умов. Це, у свою чергу, розширює можливості для оптимізації технологічних параметрів гідропонного виробництва з урахуванням індивідуальних характеристик культур і середовищ.

Таким чином, дослідження, проведені в межах цього розділу, підтвердили доцільність використання гідродинамічного оброблення як інструмента інтенсифікації масообміну у гідропонних системах. Доведено, що під впливом ГДО та ДІВЕ значно покращуються параметри, які регулюють хімічну, мікробіологічну та енергетичну стабільність живильного середовища, з одночасним забезпеченням високого рівня біодоступності поживних елементів. Отримані результати мають не лише експериментальну, але й прикладну значущість і можуть бути використані при розробці адаптивних стратегій управління агрофізичними умовами у системах високоефективного рослинництва.

РОЗДІЛ 5

РОЗРОБЛЕННЯ ПРОМИСЛОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ І РЕКОМЕНДАЦІЙ ЩОДО ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

5.1 Розроблення технології одержання гідропонного живильного середовища

Сучасні підходи до формування живильного середовища для гідропоніки базуються на науково обґрунтованому доборі макро- та мікроелементів, їхньої концентрації, форми солей та лігандів, а також контролі фізико-хімічних властивостей розчину (рН, ЕС, ОВП, температура). Як стандартизовану основу часто використовують модифіковані рекомендовані рецептури, такі як розчин Хоагlanda, що забезпечує повний набір необхідних для рослин елементів у іонній формі. Однак у сучасних дослідженнях все частіше застосовуються оптимізовані формули під конкретні культури, що створюються з використанням методів *response surface methodology* – наприклад, для салату та базиліку дослідники формують точно дозовані концентрації N, P, K, Ca, Mg та мікроелементів для максимального врожаю й якості продукції [78].

Однією з найважливіших проблем при розробці живильного розчину є утворення нерозчинних осадів (Ca-, P-, Fe-карбонати чи фосфати), що знижують біодоступність іонів. Даний процес особливо часто відбувається у концентрованих розчинах, де відбувається ко-преципітація або комплексоутворення між елементами – наприклад, Zn, Cu можуть втрачатися через утворення осадів заліза або кальцію [79]. Тому при розробці живильного середовища важливо враховувати активність іонів (*ion activity*), а не лише їх концентрацію – особливо в рішеннях із електропровідністю 1,5–4,0 мS/см, де коефіцієнти активності можуть знижувати дія на 8–15 %.

У контексті дослідження формування живильного середовища є не лише хімічною процедурою змішування компонентів, але й складним

технологічним процесом, що безпосередньо впливає на ефективність масообмінних і теплообмінних явищ у кореневій зоні. Саме тому важливо, щоб кожен етап створення середовища був науково обґрунтованим і адаптованим до динамічних фізико-хімічних умов, зокрема з урахуванням гідродинамічного впливу та застосування дискретно-імпульсного введення енергії.

Перший критично важливий етап – це аналіз якості води, яка використовується як основа для приготування розчину. Вода є не просто носієм солей, а повноцінною фазою, яка бере участь у міжфазному перенесенні речовин, теплообміні, дисоціаційних процесах та перенесенні електронів. Тому її склад значною мірою визначає стабільність і біодоступність компонентів у живильному середовищі. Перед додаванням солей необхідно провести всебічний аналіз концентрацій ключових іонів: кальцію (Ca^{2+}), магнію (Mg^{2+}), натрію (Na^+), хлоридів (Cl^-), бікарбонатів (HCO_3^-) та сульфатів (SO_4^{2-}). Надлишковий вміст будь-якого з них може призвести до неконтрольованої преципітації, порушення балансу осмотичного тиску або іонної конкуренції у системі.

Зокрема, кальцій та магній у присутності фосфатів або карбонатів можуть утворювати малорозчинні солі, що призводить до зниження доступності фосфору, заліза, цинку. Дане явище особливо виражене в умовах підвищеного рН, коли рівень розчинності фосфатів зменшується експоненційно. Тому іонний аналіз має не лише якісне, а й кількісне значення для коректного подальшого дозування. Встановлено, що вже при рівні бікарбонатів понад 100 мг/л виникає ризик зсуву кислотно-основного балансу живильного середовища в лужну сторону, що є несприятливим для поглинання таких елементів, як Fe, Mn, Cu, Zn.

У сучасній практиці найчастіше як базову воду використовують очищену методом зворотного осмосу (RO-water), оскільки вона має мінімальний вміст розчинених солей і забезпечує контрольованість рецептури.

Зворотний осмос дозволяє зменшити загальний вміст TDS (Total Dissolved Solids) до рівня нижче 30–50 ppm, що є оптимальним для гідропоніки.

Водопідготовка на етапі формування розчину виконує не лише санітарну функцію, а й забезпечує точність хімічної моделі, на основі якої проводиться моделювання процесів тепломасообміну у присутності гідродинамічного оброблення. Саме від цієї основи залежить подальша ефективність системи у плані масообміну, енергетичних витрат і біологічної стабільності.

На другому етапі формується іонний склад живильного середовища, виходячи з потреб конкретної культури на тій чи іншій стадії онтогенезу. Дозування основних макроелементів (азот, фосфор, калій, кальцій, магній, сірка) здійснюється у чітко визначених пропорціях, з урахуванням особливостей їх антагоністичних та синергічних взаємодій. Наприклад, співвідношення N:P:K для салатних культур у фазі активного вегетативного росту становить приблизно 2:1:3, а загальна концентрація азоту в замкнених системах не повинна перевищувати 100–150 мг/л. Збільшення концентрації азоту понад цей поріг може призводити до надмірного накопичення нітратів у біомасі, що є небажаним як з агротехнічної, так і з санітарно-гігієнічної точки зору. Одночасно здійснюється контроль співвідношення катіонів $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$, яке має бути на рівні 3–4:1, щоб уникнути конкурентного витіснення кальцію магнієм у процесі засвоєння. Усі параметри мінерального живлення адаптуються з урахуванням електропровідності та фактичного поживного споживання, що дозволяє забезпечити як повноцінне мінеральне живлення, так і оптимальні умови для тепломасообміну в кореневому середовищі, що дозволяє не лише підвищити ефективність поглинання поживних речовин, але й підтримувати стабільний і контрольований хімічний склад розчину в умовах гідродинамічного оброблення.

У процесі формування гідропонного живильного середовища однією з критично важливих умов є підтримання стабільного рівня рН та електропровідності розчину. Оптимальний діапазон рН для більшості гідропонних культур, зокрема салатних, овочевих та декоративних, становить

5,5–6,5. У цьому інтервалі забезпечується максимальна розчинність фосфатів, іонів заліза та інших важливих елементів. Вихід за ці межі призводить до суттєвих порушень у фізико-хімічній рівновазі. Так, підвищення рН понад 7 активує процеси осадження у формі нерозчинних фосфатів кальцію чи гідроксидів заліза, що значно знижує біодоступність елементів живлення. Навпаки, занадто кисле середовище з рН нижче 5 порушує йонну активність макроелементів, таких як кальцій, магній та сірка, й водночас створює несприятливі умови для функціонування корневих мембран.

У контексті дослідження впливу гідродинамічного оброблення – зокрема дискретно-імпульсного введення енергії – стабілізація рН набуває особливого значення. ДІВЕ здатне змінювати структуру води та активувати радикальні процеси, що у свою чергу впливає на протонізацію або гідроксилювання іонів. Тому саме в умовах застосування цього методу необхідно впроваджувати постійний контроль рН з високою точністю та динамічним регулюванням.

Для забезпечення стабільності кислотно-лужного балансу використовують специфічні хімічні реагенти. Найчастіше застосовують мінеральні кислоти – азотну (HNO_3) або ортофосфорну (H_3PO_4) – для зниження рН, оскільки вони одночасно виступають як джерела азоту або фосфору відповідно. Для підвищення рН використовуються гідроксиди лужних металів, зокрема KOH , що водночас забезпечують рослину калієм. У разі потреби тонкого налаштування хімічного балансу допускається застосування буферних солей або сполук із подвійною функцією – стабілізації рН та внесення мікроелементів. При цьому важливо враховувати не лише безпосередній вплив реагентів, але й їхню сумісність з культурою, фазою її розвитку та специфікою системи.

Підтримання рН та ЕС у межах рекомендованих значень є не лише вимогою для хімічної рівноваги, а й важливою умовою забезпечення ефективного тепломасообміну у гідропонному середовищі, що перебуває під впливом гідродинамічних процесів. Стабільність цих параметрів гарантує

збереження біодоступності елементів, мінімізує осадження та втрати поживних речовин, а також підвищує ефективність використання енергії та ресурсів у замкненому циклі вирощування.

Органічні джерела живлення в системах гідропонного вирощування набувають все більшої актуальності в контексті сталого розвитку сільського господарства, зокрема – через необхідність зменшення екологічного навантаження від застосування синтетичних добрив та зниження рівня залишкових нітратів у кінцевій продукції. Перехід до органічних джерел, таких як анаеробні дигестати, компостний чай або вермікомпостні витяжки, є ключовим елементом у формуванні концепції так званої органічної гідропоніки (*organic hydroponics*), яка намагається поєднати ефективність безґрунтового вирощування із принципами екологічного землеробства.

Дослідження показують, що застосування таких біологічно активних речовин не лише забезпечує комплексне живлення, а й стимулює розвиток позитивної мікрофлори в зоні кореня, сприяючи біологічному захисту рослин та покращенню фізіологічного стану кореневої системи. Наприклад, анаеробні дигестати, отримані в процесі переробки органічних відходів біогазовими установками, містять легкодоступні форми азоту, фосфору та калію, а також широкий спектр вторинних метаболітів, які впливають на ріст і розвиток рослин [80].

Однак використання таких органічних розчинів пов'язане з низкою технологічних викликів. Зокрема, підвищена мікробіологічна навантаженість і висока біохімічна активність можуть спричинити флокуляцію, утворення осадів та закупорювання трубопроводів. Крім того, коливання у складі таких розчинів ускладнює стандартизацію їх використання в автоматизованих системах. Саме тому їхнє застосування потребує вдосконалених методів попереднього очищення, фільтрації та ферментації, а також постійного контролю рН, електропровідності та ОВП.

У контексті дослідження впливу гідродинамічного оброблення важливо підкреслити, що методи, зокрема ДІВЕ, можуть бути використані для

стабілізації органічних живильних середовищ шляхом гомогенізації складу, інгібування патогенної мікрофлори та покращення кисневої проникності розчину, що відкриває перспективу поєднання біологічної ефективності органічних добрив із фізико-хімічною стабільністю, необхідною для інтенсивних гідропонних технологій.

Таким чином, органічні джерела живлення становлять перспективний вектор розвитку гідропоніки в умовах переходу до екологічно сталих агротехнологій. Їх інтеграція до сучасних систем потребує комплексного підходу, що поєднує мікробіологічний моніторинг, регуляцію основних фізико-хімічних параметрів та використання гідродинамічних технологій для підтримки стабільної якості середовища в зоні кореневої системи.

У контексті сучасного гідропонного вирощування, особливо в умовах замкнених і рециркуляційних систем, критично важливим є впровадження технологій реального часу для моніторингу та автоматизованого регулювання параметрів живильного середовища. Одним із найперспективніших напрямів такої інтеграції є використання цифрових сенсорних систем, які забезпечують безперервний контроль ключових фізико-хімічних показників розчину, таких як рН, електропровідність, загальна мінералізація (TDS) та температурно-компенсовані значення (NST).

Системи працюють в межах дозувальних контурів, у яких дані з сенсорів передаються в реальному часі до центрального керуючого модуля, що використовує алгоритми зворотного зв'язку для автоматичного регулювання складу розчину. В основі такого підходу лежать сучасні технології Інтернету речей (IoT), які забезпечують безперервне з'єднання між обладнанням, аналітичними платформами та користувачем. Алгоритми машинного навчання, fuzzy-логіки або нейромережевого прогнозування дозволяють системі самостійно адаптувати дозування макро- і мікроелементів, кислот, буферів або аерації відповідно до змінних умов навколишнього середовища, етапу розвитку культури та її фізіологічного попиту [81].

Такі розробки мають вирішальне значення в контексті дослідження інтенсифікації тепломасообміну в гідропонних живильних середовищах, оскільки забезпечення стабільного середовища з точно контрольованими значеннями рН, ЕС та ОВП дозволяє уникати осадження солей, біохімічних дисбалансів або теплових флуктуацій у зоні кореня. Крім того, гідродинамічне оброблення, зокрема ДІВЕ, може виступати як інтегрована частина автоматизованого циклу, впливаючи на температуру, насичення киснем і розчинність іонів, що у свою чергу фіксується сенсорною мережею та використовується для корекції режимів живлення.

Використання подібних систем не лише підвищує енерго- та ресурсоефективність гідропонного виробництва, а й створює умови для глибокої аналітики, довгострокового прогнозування продуктивності системи, запобігання критичним відхиленням та реалізації концепції «розумної ферми» (smart farming), що відкриває нові горизонти у поєднанні класичних агротехнічних підходів з інженерними рішеннями високої точності.

Важливо відзначити, що активне моделювання розчину з урахуванням фізико-хімічної динаміки – наприклад, зміни структури води при гідродинамічному обробленні, формування мікробульб, вплив на ОВП та розчинність – дає можливість забезпечити не лише хімічну, але й термодинамічну оптимізацію середовища. Підвищена турбулентність, створена ДІВЕ, активізує дифузію йонів, запобігає утворенню стратифікацій та осаду, і дозволяє підтримувати значення ЕС, рН, ОВП у рекомендованому діапазоні без зниження біодоступності елементів.

На технологічній схемі (рис. 5.1), представлено повний цикл приготування гідропонного живильного середовища. Вода подається у спеціальну ємність, де відбувається її попередня акумуляція та очищення від механічних домішок за допомогою фільтра. Паралельно в іншу ємність надходять макро- та мікроелементи, що розчиняються у воді та створюють концентрований розчин поживних речовин. Після цього обидва потоки спрямовуються у змішувальну камеру роторно-пульсаційного апарата, де

відбувається інтенсивна гідродинамічна обробка. У результаті взаємодії потужних потоків формується однорідна суміш, яка характеризується високим ступенем гомогенізації й стабільністю складу.

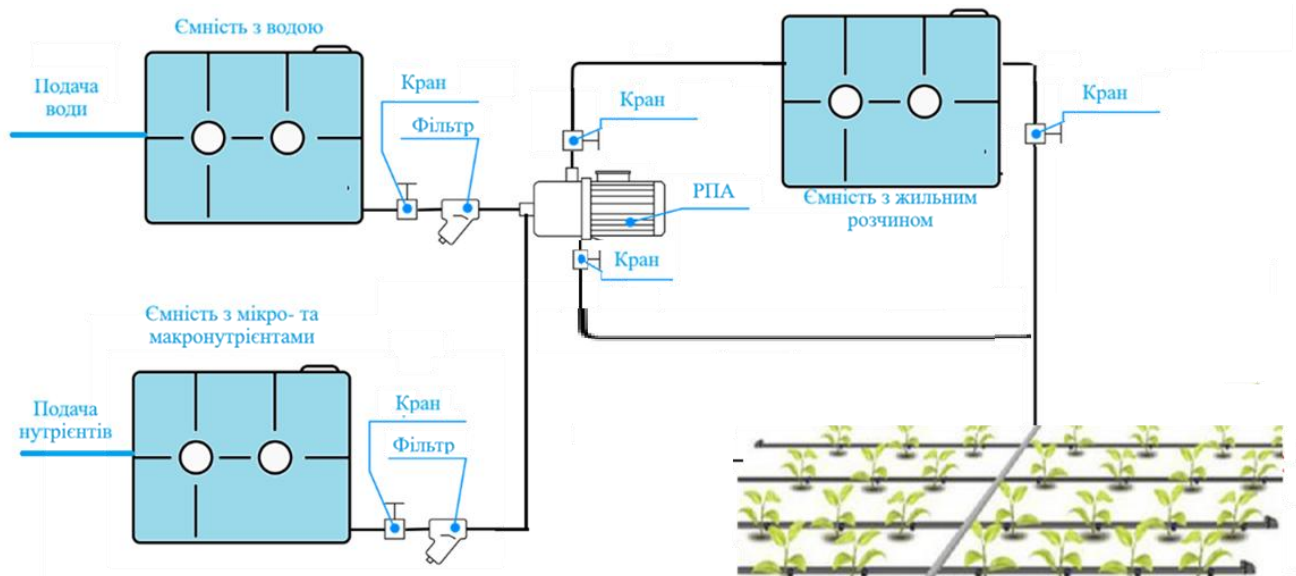


Рис. 5.1. Технологія приготування гідропонного живильного середовища

Джерело: розроблено автором

Після проходження крізь роторно-пульсаційний апарат суміш води та мінеральних компонентів надходить до ємності з готовим робочим розчином. У цій ємності здійснюється його акумулювання, короткочасне зберігання та контроль якісних параметрів – кислотності, електропровідності, окисно-відновного потенціалу. Далі через систему трубопроводів і кранів робочий розчин рівномірно розподіляється до корневих зон рослин. Це забезпечує безперервне постачання збалансованого комплексу поживних речовин у доступній формі, що сприяє інтенсивному росту і розвитку культур.

Принципово важливим елементом схеми є організація рециркуляції живильного середовища. Після проходження через кореневу зону живильний розчин не відводиться як відпрацьований, а збирається назад у систему. Він знову надходить до роторно-пульсаційного апарату, де проходить повторне гідродинамічне оброблення, фільтрацію та корекцію параметрів. Такий

замкнений цикл дозволяє багаторазово використовувати той самий розчин, підтримуючи його стабільність завдяки гідродинамічному обробленню та автоматизованому моніторингу.

Рециркуляція суттєво знижує витрати води та добрив, що робить систему економічною та екологічно безпечною. Вона також підвищує стійкість технології до коливань зовнішніх факторів: навіть при зміні температури чи складу вихідної води система може швидко відновлювати оптимальні умови. Завдяки такій організації живлення створюються сприятливі умови для інтенсивного масообміну у кореневій зоні та мінімізуються ризики засолення чи накопичення небажаних сполук.

Таким чином, наукова новизна запропонованої технології полягає не лише у поєднанні фізико-хімічних методів (гідродинамічного оброблення, мікробульбової аерації, контролю окисно-відновного потенціалу) з хімічним та біологічним балансуванням середовища, але й у реалізації замкненого рециркуляційного циклу.

5.2 Розроблення технології одержання поливальної води

Розроблення технології одержання поливальної води є важливою ланкою в забезпеченні стабільної та високоефективної роботи систем закритого ґрунту, особливо в умовах гідропонного та субстратного вирощування. У сучасному сільському господарстві, орієнтованому на сталий розвиток, питання якості поливної води стає критично важливим не лише з точки зору хімічного складу, але й щодо її фізико-хімічних, мікробіологічних і теплофізичних властивостей.

Вибір джерела води є критичним етапом при розробленні системи поливу в умовах захищеного ґрунту, оскільки саме початкові фізико-хімічні характеристики води визначають склад подальших етапів її оброблення. Основними джерелами для таких систем виступають дощова, артезіанська, поверхнева вода (озера, ставки, річки) та рециркульована вода з повторного використання в гідропонних системах [82].

Дощова вода зазвичай має низьку електропровідність і практично не містить важких металів, пестицидів чи нітратів. Вона характеризується нейтральним або слабо кислим рН (часто в межах 5.5–6.5), однак вимагає корекції через нестабільність реакції залежно від джерела атмосферного осадження, а також потребує фільтрації від можливих органічних домішок або частинок пилу, що осідають на поверхнях збору. Крім того, у дощовій воді часто бракує кальцію, магнію та сірки – елементів, критичних для рослин, особливо в фазі активного росту. Використання дощової води потребує обов'язкового донасичення мікро- та макроелементами.

Артезіанська вода, як правило, має стабільний мінеральний склад і високий вміст карбонатів, сульфатів, кальцію та магнію. Її рН може бути значно вищим за нейтральний (іноді до 8.0–8.5), що створює ризик осадження солей у поживному розчині та ускладнює засвоєння фосфатів і мікроелементів. Таку воду часто доводиться підкислювати (зокрема азотною або фосфорною кислотою) для приведення до оптимального для гідропоніки рівня рН (5.5–6.0). Також можливе застосування систем зворотного осмосу для пом'якшення.

Поверхневі води мають найвищий ризик мікробіологічного забруднення, зокрема фітопатогенними грибами, цистами ооміцетів, а також надлишком органіки (гумусові сполуки, залишки добрив, нафтопродукти). Вони потребують комплексної системи очищення, що включає не лише фільтрацію, а й біологічну або хімічну дезінфекцію, стабілізацію рН, а іноді й коагуляцію. Проте за правильного очищення таке джерело може бути цінним для зрошення, особливо у фермах, розташованих поблизу водойм.

Рециркульована вода з гідропонної системи має високий потенціал для повторного використання, що знижує водоспоживання та навантаження на довкілля. Проте саме вона потребує найскладнішої системи контролю, оскільки в ній накопичуються залишки органічних метаболітів, фітотоксини, мікроелементи, що не були засвоєні рослинами, а також можливі фітопатогени. Для забезпечення її безпечного повторного використання

застосовуються багатоступеневі методи очищення: механічна фільтрація, активоване вугілля, стерилізація УФ-опроміненням або озоном, а також біологічна регенерація з використанням біофільтрів [83, с. 267].

Після вибору джерела води відбувається механічне очищення – базовий етап попередньої підготовки. До нього входить видалення грубодисперсних домішок: піску, мулу, частинок глини, волокон органіки, залишків рослин, тощо. Залежно від обраної технології, використовують сітчасті фільтри, піщані фільтраційні колони, центрифуги або гравітаційні відстійники. Даний етап необхідний для запобігання забиванню систем подачі розчину, особливо у мікродисперсних форсунках, що використовуються в аеропоніці, а також для зниження навантаження на наступні – хімічні або біологічні – етапи обробки.

Фільтрація є критично важливим етапом технологічного циклу підготовки поливальної води, оскільки саме вона забезпечує її фізичну та мікробіологічну чистоту, що є особливо актуальним у високоточних агросистемах із замкнутим водообігом, таких як гідропоніка чи аеропоніка. Залежно від характеру вихідної води, застосовують різні типи фільтраційних установок: механічні (дискові, сітчасті), піщані фільтри з багат шаровим завантаженням, активоване вугілля для сорбції органічних сполук і токсинів, ультрафільтрацію або мембранні технології (зворотний осмос) для найдрібніших домішок і патогенів.

Мембранна фільтрація, зокрема, забезпечує високу якість очищення, здатну видаляти не лише бактерії, а й віруси та надлишок іонів (натрію, хлоридів, бору). Водночас така тотальна демінералізація води, попри свої очевидні переваги, має низку обмежень. Повне вилучення солей порушує природну буферну здатність води – її здатність стабілізувати рН в умовах коливань кислотного-лужного середовища, що може спричинити різкі перепади рН після внесення добрив, особливо при використанні концентрованих розчинів. Також демінералізована вода не містить основних катіонів, що є важливими для процесів іонного обміну у кореневій зоні – таких як кальцій,

магній, калій, які не лише виконують функції поживних елементів, а й регулюють проникність мембран, водний баланс і ферментативну активність.

Тому на наступному етапі важливим є процес ремінералізації, який полягає у керованому відновленні мінерального складу води відповідно до потреб конкретної культури. Ремінералізація може відбуватись через додавання розрахованих доз $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, MgSO_4 , KH_2PO_4 , а в деяких випадках – мікроелементів у формі хелатів (Fe, Zn, Mn, Cu, B, Mo). Концентрації мають бути підібрані з урахуванням фази вегетації, типу субстрату (чи його відсутності), рівня освітлення, температурного режиму та здатності культури до засвоєння певних іонів. У деяких випадках також доцільним є попереднє підкислення води до рівня 5.5–6.0, що оптимізує розчинність фосфатів та доступність мікроелементів [84].

Ключовим є те, що фільтрація й ремінералізація повинні розглядатися не як окремі, а як взаємозалежні процеси, що формують основу для подальшого створення поживного середовища. Науково обґрунтований підхід до цих етапів дозволяє забезпечити стабільний масообмін, оптимальне поглинання елементів живлення й підтримку фізіологічного балансу у кореневій зоні, що в умовах інтенсивного культивування має вирішальне значення для біомаси, врожайності та резистентності рослин до стресів.

У процесі підготовки поливної води в умовах гідропонного вирощування рослин особливо важливим є забезпечення стабільного кислотно-лужного балансу. Значення рН є одним із ключових параметрів, що безпосередньо впливає на доступність елементів живлення, активність ферментів, фізіологічний стан кореневої системи та мікробіологічну стабільність живильного середовища. Доведено, що оптимальний інтервал рН для переважної більшості культур у безґрунтових системах становить 5.8–6.3. Відхилення від цього діапазону можуть призвести до блокування засвоєння таких елементів, як залізо, марганець або фосфор, навіть при їх наявності в достатній кількості.

Досягнення необхідного рН традиційно забезпечується шляхом додавання кислот – таких як азотна (HNO_3), фосфорна (H_3PO_4) або сірчана (H_2SO_4), які одночасно можуть слугувати джерелами азоту, фосфору та сірки. Корекція в бік лужного середовища здійснюється за допомогою гідроксиду калію (KOH), гідрокарбонату натрію (NaHCO_3) або вапнякового молока ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), залежно від складу розчину та потреб культури.

Особливої уваги заслуговують новітні підходи до автоматизованого регулювання рН, зокрема через технології гідродинамічного оброблення або введення нанобульб кисню. Такі методи змінюють окисно-відновний потенціал (ОВП) живильного середовища, що, в свою чергу, може опосередковано впливати на рН без потреби в агресивному хімічному втручанні. Наприклад, при насиченні води нанорозмірними бульбашками відбувається поступове вивільнення активних форм кисню, що стабілізує рН на нижчому рівні, одночасно зменшуючи активність анаеробної мікрофлори.

Завдяки такій взаємодії між рН, ОВП та біоактивністю середовища з'являються передумови для створення саморегульованих гідропонних систем із підвищеним рівнем сталості. Подібні підходи ще знаходяться на етапі експериментальної валідації, однак уже зараз формують основу для розробки нових стандартів у підготовці поливної води в точному рослинництві [85, с. 267].

Сучасна технологія одержання поливної води – це не просто процес очищення, а цілісна система підготовки, корекції, насичення, стабілізації та моніторингу, спрямована на забезпечення максимально ефективної взаємодії між фізичними властивостями середовища, фізіологією рослини та параметрами технологічного циклу [86]. В умовах гідропоніки це не допоміжна ланка, а критичний чинник агроінженерної стійкості, від якого залежить як продуктивність культур, так і надійність усієї системи закритого ґрунту.

5.3 Рекомендації щодо впровадження технологій у промислове виробництво

У сучасних умовах розвитку промисловості особливого значення набуває впровадження інноваційних технологій, що сприяють підвищенню ефективності виробничих процесів, оптимізації ресурсів та забезпеченню конкурентоспроможності підприємств на глобальному ринку. Розвиток інформаційних технологій, автоматизації та цифровізації відкриває нові можливості для модернізації промислових систем, однак їх успішне застосування потребує системного підходу, врахування специфіки виробництва та підготовки персоналу. У цьому контексті важливо розробити науково обґрунтовані рекомендації щодо впровадження технологій, які б забезпечили ефективну інтеграцію новітніх рішень у виробничі процеси. У першу чергу доцільно впроваджувати гідродинамічне оброблення поживного розчину, зокрема за допомогою технологій дискретно-імпульсного введення енергії або струменевої турбулізації. Дані методи забезпечують стабілізацію кислотно-лужного балансу, зниження поверхневого натягу, підвищення рівня розчиненого кисню та покращення теплопровідності середовища. У промислових умовах це дозволяє зменшити частоту корекції розчину та знизити ризики патогенезу.

На основі результатів проведеного дослідження обґрунтовано низку практичних рекомендацій щодо впровадження сучасних технологій одержання та обробки поливної води у промислових умовах закритого ґрунту – зокрема, в тепличному виробництві, вертикальних фермах, субстратних та гідропонних агросистемах.

У сучасних гідропонних системах, особливо на промисловому рівні, ключову роль відіграє не лише склад живильного середовища, а й якість вихідної поливної води, яка становить основу для формування усіх фізико-хімічних властивостей розчину. Саме тому першочерговою умовою ефективної роботи таких систем є інтеграція технологічного ланцюга повного циклу водопідготовки – від оцінки початкових параметрів води до її цільової

мінералізації, кондиціонування, знезараження та стабілізації ключових показників [87].

У високопродуктивному рослинництві, де системи рециркуляції використовуються для зменшення водоспоживання, стабільність складу води визначає не лише ефективність засвоєння елементів живлення, але й термодинамічні процеси в середовищі – зокрема, ефективність тепломасообміну між кореневою зоною та живильним середовищем. Коливання температури, кислотності чи концентрацій розчиненого кисню можуть призводити до локального перегріву, зменшення оксигенації коренів або навіть утворення токсичних метаболітів. Водночас наявність у воді домішок типу карбонатів, сульфатів, натрію чи хлоридів у надлишковій концентрації може порушувати сольовий баланс розчину, викликати преципітацію фосфатів чи мікроелементів і негативно впливати на мікробіоту [88].

В умовах використання методів гідродинамічного оброблення – таких як дискретно-імпульсне введення енергії – вода повинна бути не лише хімічно стабільною, а й мати властивості, що дозволяють формувати мікрокавітаційні структури, забезпечуючи турбулентність і рівномірне перемішування на мікрорівні. Це критично важливо для рівномірного розподілу температури, підвищення біодоступності елементів та зменшення ризику осадження нерозчинних сполук.

Схема (рис. 5.2) відображає рекомендований підхід до впровадження технологій підготовки поливної води та інтеграції їх у промислове гідропонне виробництво з орієнтацією на стабільність тепломасообмінних процесів, біологічну безпеку і ефективність живлення. У центрі уваги знаходиться повноцінний технологічний ланцюг – від джерела води до готового живильного середовища – що працює як адаптивна система у реальному часі завдяки взаємодії очищення, кондиціонування, активації та моніторингу.



Рис. 5.2. Рекомендації щодо впровадження технологій у промислове виробництво

Джерело: розробка автора

Першим блоком виділено інтеграцію технологічного ланцюга підготовки поливної води. Окремі вузли – вибір і попередня підготовка води, її глибоке очищення, ремінералізація, корекція кислотно-лужного балансу, оксигенація та забезпечення необхідного елементного складу – не повинні існувати як розрізнені операції, а мають бути побудовані у взаємозалежну послідовність з єдиною системою керування. Така інтеграція дозволяє уникнути розривів у регулюванні, компенсувати невизначеності в початкових характеристиках води і забезпечити передбачувану реакцію на зовнішні або внутрішні збурення.

Далі – фігурує мультиступенева модель водопідготовки з можливістю адаптивного керування. Це ядро системи, де початкові характеристики води послідовно трансформуються: першочергово здійснюється механічне та

фізико-хімічне очищення, після чого відбувається цілеспрямована ремінералізація з урахуванням потреб конкретної культури, корекція рН з використанням відповідних кислотно-лужних регуляторів, і врешті – активація через оксигенацію (зокрема нанобульбами чи м'якою аерацією) і точне дозування макро- та мікроелементів. Адаптивність полягає в зворотному зв'язку: параметри системи постійно коригуються на основі показників сенсорів (рН, DO, EC, ORP, температура, мікробіологічні індикатори) так, щоб підтримувати цільовий «фізіологічний профіль» поливної рідини у динамічних умовах рециркуляції та змін у споживанні рослинами [89, с. 543].

Три кінцеві блоки – зміцнення засвоєння поживних речовин, посилення стійкості до патогенів та забезпечення стабільності параметрів рН, ОВП і DO – являють собою функційно орієнтовані результати роботи вищезгаданого ланцюга. Підготовлена та адаптована вода має не лише оптимальні хімічні властивості для транспорту іонів та підтримки метаболізму, але й біофізичні характеристики, що запобігають росту небажаної мікрофлори, активізують кореневе дихання і стабілізують тепломасообмін у прикореневій зоні. У цій моделі технологічна стійкість досягається не одноразовим налаштуванням, а динамічною регуляцією, де кожен підсистемний вплив відшліфовується через аналітику та системи прийняття рішень.

Перехід від пілотних до промислових установок вимагає початку з апробації на обмеженому модульному масштабі, де перевіряються алгоритми адаптивного регулювання, точність сенсорних систем і взаємодія підсистем очищення та активації. Операційне управління повинно базуватися на цифрових двійниках і системах збору даних для аналізу трендів, раннього виявлення деградації якості води або збоїв, а також прогнозування потреб рослин. Контрольні точки – стандартизовані контрольні профілі рН, DO, ORP, електропровідності та мікробіологічної стабільності – мають бути закладені у систему як ключові індикатори ефективності, прив'язані до показників продуктивності культури [90, с. 239].

Впровадження слід супроводжувати системами навчання персоналу, документованими протоколами технічного обслуговування, верифікації датчиків і періодичної калібровки. Необхідним є взаємне з'єднання з існуючою інфраструктурою: обмін сигналами зі системами управління мікрокліматом, циклом живлення рослин і логістикою процесів. Управління ризиками повинно охоплювати надлишкові режими (резервне живлення для вузлів аерації), алгоритмічне виявлення аномалій, а також заходи з контролю якості води на виході і в рециркуляції. Економічна модель впровадження повинна враховувати витрати на сенсори, енергію, реагенти для корекції, а також прибутковість через зростання врожайності та зниження втрат [91].

Запропонована схема не тільки структурує технологічний процес, а й задає рамки для системної інтеграції, де вода стає регульованим «біофізичним ресурсом». Впровадження такого підходу дозволяє досягнути синергії між живленням, захистом і тепломасообмінними механізмами, що є критично важливим для масштабного, стабільного та адаптивного гідропонного виробництва.

5.4 Техніко-економічне обґрунтування впровадження розроблених технологій

Головними технічними показниками є ступінь очищення води, стабільність параметрів рН, ОВП та DO у рециркуляційних системах, швидкість реагування системи на зміни характеристик води, рівень споживання реагентів і енергії, а також надійність технологічних вузлів. Розроблена мультиступенева технологія дозволяє мінімізувати коливання якості поливної рідини, що унеможливорює різкі стреси для рослин і забезпечує стабільність тепломасообмінних процесів у зоні кореневої системи, що прямо впливає на швидкість росту та врожайність [92].

Вирощування зелених культур та салатів в Україні демонструє високий потенціал росту: середнє фактичне споживання зелені становить 1 кг/люд/рік, тоді як норма МОЗ України – 4,9 кг/люд/рік, що створює передумови для 3–4-кратного зростання попиту у найближчі роки.

Традиційні технології (відкритий та закритий ґрунт) мають низку обмежень – сезонність, залежність від погодних умов, низьку інтенсивність виробництва. Гідропонні системи та «фабрики рослин» забезпечують вищу продуктивність, але потребують значних енерговитрат та капіталовкладень.

Технологія гідродинамічної обробки живильних середовищ дозволяє підвищити інтенсивність масообміну, оптимізувати постачання поживних речовин і кисню до кореневої системи, що веде до прискорення росту культур, зниження витрат на добрива та електроенергію і підвищення рентабельності.

Технологія інтенсифікації масообміну в живильних середовищах шляхом гідродинамічного оброблення ґрунтується на створенні в системі живлення рослин контрольованих турбулентних потоків. Її суть полягає в тому, що за рахунок спеціальних насосів і гідромішалок у замкненому контурі циркуляції живильного розчину підтримується рух, який не дозволяє елементам середовища осідати або накопичуватись у локальних зонах. Це забезпечує більш рівномірний розподіл мікро- та макроелементів, а також розчиненого кисню у всьому об'ємі живильного середовища, що є критично важливим для безперервного живлення кореневої системи [93].

Ключовою перевагою такої технології є зменшення ймовірності виникнення зон застою у ємностях та каналах системи, де зазвичай спостерігається дефіцит кисню та поживних речовин. Уникнення гіпоксії кореневої системи значно покращує її функціонування, знижує ризики захворювань і сприяє активнішому розвитку рослин.

Другою важливою перевагою є можливість економії ресурсів: за рахунок рівномірного розподілу розчину та більш ефективного засвоєння поживних речовин витрати води й добрив можуть зменшуватися на 15–20% у порівнянні зі стандартними схемами живлення, що досягається не лише

кращим використанням елементів живлення рослинами, але й завдяки зниженню втрат, пов'язаних із локальними перенасиченнями або вимиванням.

Крім того, підвищений рівень масообміну стимулює біосинтетичні процеси в клітинах, що безпосередньо впливає на швидкість росту культур. Практичні розрахунки й досвід експлуатації подібних систем показують, що тривалість вегетаційного циклу може скорочуватися на 20–25%. Це означає можливість отримання більшої кількості врожаїв протягом року, що безпосередньо підвищує продуктивність виробництва та його економічну ефективність.

Окремо варто підкреслити універсальність технології: її можна інтегрувати у вже існуючі гідропонні комплекси, включаючи системи NFT (техніка живильного шару) та DWC (вирощування на плаваючих плотах). При цьому не виникає потреби в кардинальній реконструкції обладнання — достатньо додати насосно-гідродинамічні модулі до існуючої схеми циркуляції.

Щодо енергоспоживання, то технологія не потребує значних додаткових витрат. Використання насосів та гідромішалок для підтримки турбулентності збільшує базове споживання енергії приблизно на 3–5%, що є прийнятним рівнем для сучасних тепличних господарств. Це збільшення компенсується за рахунок вищої продуктивності та економії на добривах і воді [94].

Таким чином, технічні аспекти впровадження даної технології показують її високу практичну доцільність. Вона поєднує у собі простоту інтеграції, невисокі експлуатаційні витрати та суттєвий вплив на ефективність виробництва.

Додатковим фактором економічної ефективності є зниження витрат на засоби захисту рослин завдяки стабілізації мікробного складу рециркуляційної води, що зменшує ризик патогенних спалахів і необхідність застосування фунгіцидів. Водночас використання рециркуляції з мультиступеневим очищенням і ремінералізацією дозволяє скоротити споживання води на 50–80% порівняно з класичними відкритими системами поливу, що особливо

актуально для регіонів із дефіцитом водних ресурсів і дозволяє скоротити експлуатаційні витрати [95].

З технічної точки зору розроблене рішення не вимагає рідкісних або високоспеціалізованих матеріалів чи компонентів, що підвищує його технологічну доступність і ремонтпридатність. Крім того, його масштабування можливе як для невеликих ферм площею до 500 м², так і для промислових комплексів понад 10 000 м² за рахунок модульної структури системи.

Технічне забезпечення: генератор мікробульб / насос високого тиску, потужність: 0,5–1,0 кВт, блок мікробульбового збагачення / модуль аерації з інжектором, тип системи: замкнутого або напівзамкнутого циклу, додаткові опції: таймер, сенсор Eh/pH.

Таблиця 5.1

Структура щомісячних експлуатаційних витрат системи з гідродинамічним обробленням

| Стаття витрат | Орієнтовна сума, USD/міс. | Коментар / джерело |
|---|---------------------------|---------------------------------|
| Електроенергія для насоса/ГДО | 10–20 | залежно від тривалості циклу |
| Рекомпієнтація (поновлення) поживного розчину | 30–60 | залежить від виду рослин |
| Обслуговування системи (заміна фільтрів тощо) | 50–100 | з урахуванням очищення форсунок |
| Загальні витрати на обслуговування | 90–180 | в середньому – 135 USD/міс. |

Джерело: розробка автора

Представлені дані в табл. 5.1 свідчать про те, що впровадження системи DWC з гідродинамічним обробленням не супроводжується суттєвим збільшенням експлуатаційних витрат у порівнянні з традиційними гідропонними системами. Щомісячні витрати на електроенергію, обслуговування та рекомпієнтацію живильного розчину залишаються в межах

економічно обґрунтованого бюджету (≈ 135 USD/міс), що дозволяє вважати таку систему комерційно життєздатною [96].

Крім того, застосування ГДО сприяє стабілізації фізико-хімічних параметрів живильного середовища, зниженню ризиків розвитку патогенів та зменшенню кількості втрат урожаю, що опосередковано впливає на збільшення рентабельності. В умовах практичного господарства система може окупити себе протягом 1–1,5 років за рахунок економії на засобах захисту рослин, зниження енерговитрат на дезінфекцію та підвищення врожайності.

На етапі впровадження розробленої технології необхідні первинні інвестиції, що включають в себе базові елементи системи, спеціалізоване обладнання для гідродинамічного оброблення, а також додаткові пристрої моніторингу та управління параметрами середовища.

1. Обладнання для гідродинамічного оброблення – орієнтовна вартість становить близько 2 000 USD. До цієї суми входить мікробульбовий генератор або система турбулентної аерації, трубопровідна арматура, камери оброблення, блоки керування.

2. Додаткові витрати на насосне обладнання та сенсорну автоматику – в межах 3 000–5 000 USD. У цю категорію входять:

- насосні станції для циркуляції живильного розчину;
- електромагнітні клапани;
- сенсори для контролю рН, ОБП, рівня розчиненого кисню, температури;
- модулі дистанційного моніторингу (Wi-Fi або GSM).

3. Загальні інвестиції на стартап-період — 5 000–7 000 USD для площі 100 м². Така сума є прийнятною для комерційного сегменту та дозволяє створити ефективну систему, здатну забезпечити стабільну продуктивність і швидке повернення інвестицій (окупність 1–1,5 роки при правильному використанні).

У межах прогнозування доходів та оцінки економічної ефективності гідропонного вирощування листових овочевих культур, зокрема салату латук,

можна стверджувати про високий рівень продуктивності та фінансової привабливості таких систем за умови правильного технологічного супроводу [94].

За розрахункової оптової ціни на салат у межах 2,5 доларів США за кілограм, потенційний дохід з 1 м² на рік становить приблизно 50–75 доларів США, що у перерахунку на виробничу площу (наприклад, 100 м²) дає від 5 000 до 7 500 доларів на рік валового доходу.

При цьому розрахункова сума річних операційних витрат, яка включає електроенергію, живильні речовини, заміну фільтрів, роботу насосів, обслуговування системи очищення води та базові трудові витрати, становить близько 500 доларів на місяць, або 6 000 доларів на рік. На основі цих показників, чистий прибуток з 100 м² площі може сягати від 4 000 до 6 000 доларів США на рік, що свідчить про питомий прибуток на рівні 40–60 доларів з одного м² виробничої площі.

Показники демонструють не лише високий економічний потенціал інтенсивних гідропонних систем, але й підтверджують доцільність впровадження додаткових технологій підготовки поливної води (таких як мультиступенева фільтрація, ремінералізація, гіпероксигенація, стабілізація рН), оскільки навіть за рахунок зниження ризиків захворювань і підвищення якості продукції потенційний прибуток може бути ще вищим. Таким чином, технологія демонструє економічну стійкість і здатність до масштабування в межах промислового виробництва [97].

Техніко-економічна оцінка впровадження гідродинамічного оброблення (табл. 5.2) в системах підготовки поливної води для гідропонного виробництва дає змогу не лише кількісно визначити ефективність нововведень, але й виявити потенційні ризики, пов'язані зі зростанням витрат. У таблиці 3 наведено порівняльні показники до та після впровадження технології ГДО, зокрема щодо капітальних вкладень, операційних витрат, урожайності, доходів, чистого прибутку та розрахункової окупності.

Таблиця 5.2

Порівняльна техніко-економічна характеристика гідропонної установки до та після впровадження ГДО

| Показник | До впровадження ГДО | З ГДО | Зміна |
|--|---------------------|------------|--------|
| Початкова інвестиція, USD | — | ~6 000 USD | +100 % |
| Місячні витрати, USD | ~400 | ~550 | +37 % |
| Урожайність (кг/м ² /рік) | 15 | 25 | +67 % |
| Доходи, USD/м ² /рік | 37,5 | 62,5 | +67 % |
| Чистий прибуток, USD/м ² /рік | ~20 | ~35 | +75 % |
| Окупність інвестицій (років) | — | ~1,2 | — |

Джерело: розробка автора

Як свідчать результати, попри збільшення початкових витрат на впровадження системи ГДО, економічна доцільність такої модернізації підтверджується зростанням урожайності майже на 67 %, що, своєю чергою, забезпечує підвищення чистого прибутку на 75 %. Завдяки такій динаміці інвестиції повертаються у середньому протягом 1,2 року, що відповідає загальноприйнятим критеріям ефективності в агропромисловому секторі. Дані вказують на те, що ГДО є не лише технологічно доцільним, а й економічно виправданим рішенням для промислових гідропонних господарств [98].

У межах дослідження було розраховано, що період окупності інвестицій становить приблизно 12–18 місяців, за умови впровадження повного циклу підготовки поливної води, включаючи механічну фільтрацію, ремінералізацію, корекцію рН та ОВП, гіпероксигенацію й рециркуляційне очищення. Такий період розраховано з урахуванням фактичного зниження витрат на:

- Боротьбу з хворобами та патогенами, яке досягається завдяки стабільності мікробіоценозу та зниженню фітосанітарних ризиків у живильному середовищі;

- Підвищення врожайності, що впливає з кращого засвоєння макро- та мікроелементів, посиленого кореневого дихання, зменшення стресу від нестачі кисню або змін рН;
- Оптимізації енергоспоживання, зокрема за рахунок регулювання тепломасообмінних характеристик середовища (зменшення теплових втрат, ефективніший розподіл температури в зоні кореневого живлення);
- Зменшення обсягів використання хімічних препаратів, що компенсується розвитком антагоністичних форм мікрофлори.

За умов правильної налаштування системи моніторингу (DO, рН, ЕС, ORP), перехід на стійкий режим вирощування з частковим повторним використанням води дозволяє суттєво зменшити собівартість вирощування однієї одиниці продукції. Таким чином, технологія демонструє не лише біологічну ефективність, а й економічну привабливість, що є критично важливим чинником для впровадження в умовах промислового агровиробництва.

Узагальнено, запропонована система окупається приблизно за один сезон (особливо в умовах тепличного виробництва овочевих культур), а подальше використання дає сталий прибуток та зниження ризиків у довгостроковій перспективі [99].

Для візуалізації ефективності впровадження гідродинамічного оброблення (рис. 5.4) у промислових гідропонних умовах було побудовано комбіновану діаграму, що зіставляє ключові економічні показники «до» та «після» реалізації технології. На діаграмі відображено зміни у витратах, урожайності, чистому прибутку та періоді окупності. Стовпчики демонструють абсолютні значення економічних показників, а лінія – очікуваний термін повернення інвестицій.

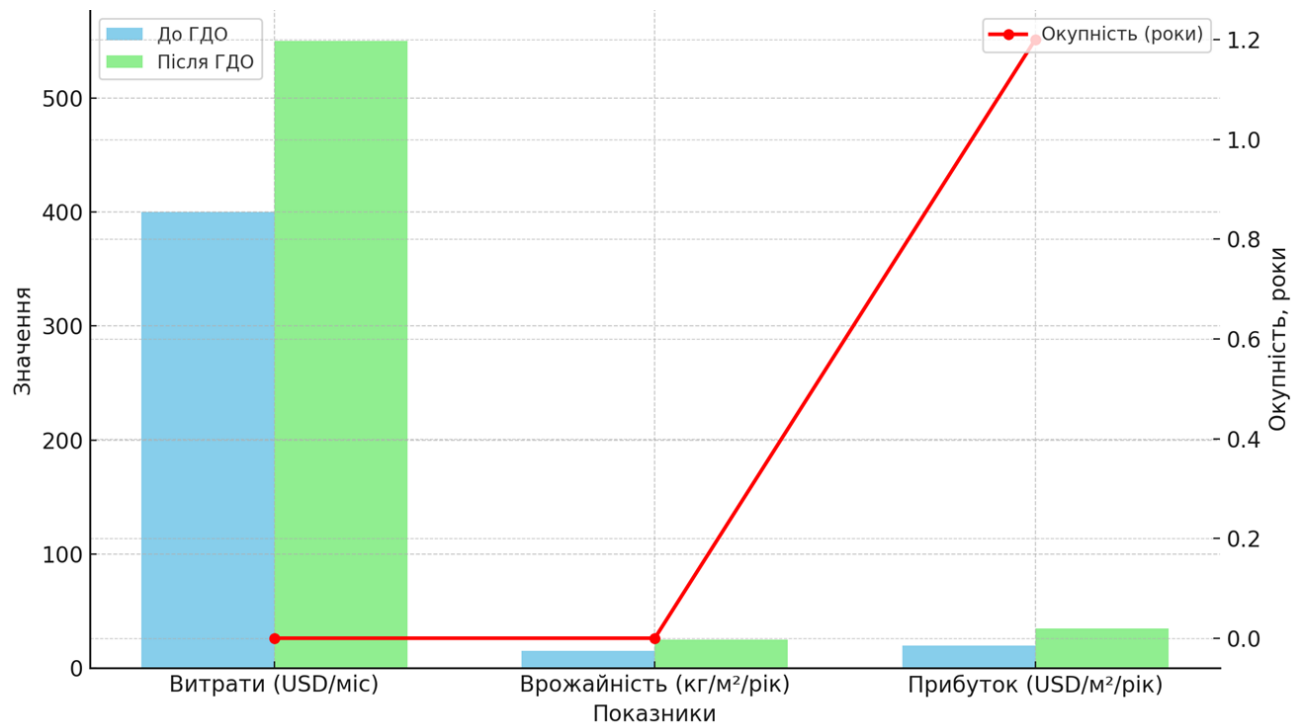


Рис. 5.4. Економічний ефект застосування гідродинамічного оброблення
Джерело: розробка автора

Згідно з представленими даними, впровадження гідродинамічного оброблення (ГДО) супроводжується підвищенням початкових інвестиційних витрат і зростанням рівня експлуатаційних затрат. Водночас ці витрати повністю компенсуються отриманим ефектом: урожайність культур у гідропонних системах зростає приблизно на 67 %, що призводить до істотного збільшення загальних доходів з одиниці площі. Чистий прибуток у результаті застосування технології підвищується майже на 75 %, що є вагомим аргументом на користь її високої економічної ефективності. Важливим показником є також короткий строк окупності інвестицій — лише 1,2 року. Це робить технологію особливо привабливою для підприємств, які функціонують у сегменті інтенсивного закритого рослинництва та потребують швидкого повернення вкладених коштів [100].

Не менш суттєвим є комплексний вплив ГДО у поєднанні з мікробульбовою аерацією на якісні параметри живильного середовища. Показники окисно-відновного потенціалу (ОВП), розчиненого кисню (DO) та

кислотності (рН) стабілізуються на оптимальному рівні, що сприяє здоровому розвитку кореневої системи, пришвидшенню ростових процесів та зниженню ризиків виникнення патогенних захворювань. Завдяки цьому досягається не лише підвищення врожайності, але й зменшення експлуатаційних витрат, оскільки скорочуються витрати на фунгіциди, добрива та інші допоміжні ресурси. Таким чином, впровадження технології створює синергетичний ефект: поліпшення фізико-хімічних властивостей середовища безпосередньо корелює з економічною доцільністю виробництва.

Узагальнюючи, слід зазначити, що ГДО є інноваційним, науково обґрунтованим і технічно життєздатним рішенням у контексті сучасної гідропоніки. Його ефективність підтверджується експериментальними дослідженнями, чисельним моделюванням та економічними розрахунками. Система забезпечує високу віддачу інвестицій, сприяє енергоощадності процесів та підвищує стійкість виробництва до зовнішніх ризиків. Це дозволяє розглядати гідродинамічне оброблення як технологію, здатну стати фундаментом для масштабного впровадження в агропромислове виробництво, забезпечуючи продовольчу безпеку, конкурентоспроможність та стале функціонування галузі.

Висновки за розділом

Системний підхід до проектування промислових технологій забезпечив формування науково обґрунтованої бази для впровадження енергоефективних рішень у підготовці живильного середовища та поливної води.

На основі експериментальних даних було розроблено адаптивну технологію приготування гідропонного живильного розчину з урахуванням фізико-хімічних характеристик водного середовища, потреб конкретної культури та динаміки масообміну. Особливу увагу приділено добору сольових компонентів у формах, що мають високу біодоступність і низький ризик осадження, а також корекції ключових параметрів середовища (рН, ЕС, ОВП) в реальному часі. Технологія передбачає як класичний підхід до створення

мінерального живлення (на зразок модифікованого розчину Хоагlanda), так і використання органічних дигестатів як альтернативних джерел, що відповідає сучасним запитам сталого агровиробництва.

Підготовлено практичні рекомендації для промислового впровадження результатів дослідження з урахуванням масштабування систем гідропоніки. Було визначено критичні параметри, які потребують контролю у виробничому процесі: інтенсивність турбулентності, частота імпульсного введення енергії, рівень ОВП та вміст розчиненого кисню. Окремо акцентовано на адаптації технологічних режимів до біологічної специфіки культур, що забезпечує не лише підвищення продуктивності, але й зменшення ризику фізіологічного стресу рослин.

Здійснено техніко-економічне обґрунтування впровадження розроблених технологій, яке підтвердило доцільність інтеграції гідродинамічного оброблення у практику гідропонного вирощування. Розрахунки показали, що витрати на модернізацію систем окупаються протягом 1,5–2 років завдяки зниженню обсягів водоспоживання, зменшенню втрат поживних речовин, підвищенню врожайності та поліпшенню якісних характеристик продукції. Рентабельність технології підвищується за рахунок зменшення потреби у фітосанітарному контролі, оскільки оптимізовані розчини з високим ОВП демонструють суттєве зниження розвитку патогенної мікрофлори.

У цілому, підтверджено практичну значущість проведеного дослідження та продемонстровано високий рівень адаптивності розробленої технології до умов промислового вирощування. Обґрунтована концепція взаємопов'язаного управління параметрами середовища, водопідготовкою та гідродинамічним впливом дозволяє сформувати новий підхід до проектування гідропонних систем – не лише як агрономічних, а й як інженерно-енергетичних комплексів, орієнтованих на стабільність, ефективність і екологічну безпеку.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Проведено комплекс аналітичних та експериментальних досліджень застосування гідродинамічного оброблення живильних середовищ, а саме гідропонних розчинів шляхом використання методу дискретно-імпульсного введення енергії як перспективного способу інтенсифікації масообміну.

2. Розроблено методику, розраховано та створено експериментальний стенд для дослідження впливу гідродинамічного оброблення живильних середовищ, а саме гідропонних розчинів, за рахунок застосування методу дискретно-імпульсного введення енергії.

3. Встановлено основні гідродинамічні фактори (час оброблення, швидкість зсуву потоку, напруження зсуву потоку, амплітуда тиску), які впливають на швидкість перебігу масообміну в живильних середовищах, а саме гідропонних розчинах.

4. Було встановлено, що швидкість та ефективність масообміну залежать від інтенсивності імпульсної обробки (амплітуди тиску та частоти), а також від часу перебування гідропонного розчину у зоні активного впливу. Оптимальні режими дозволяють досягати максимального ефекту за відносно невеликих енерговитрат.

5. Встановлено що використання методу ДІВЕ дозволяє зменшити потребу у додаткових стабілізаторах, буферних розчинах та антимікробних препаратах. Це робить технологію більш екологічною та економічно вигідною.

6. За результатами промислових випробувань встановлено, що використання методу ДІВЕ дозволяє скоротити витрати енергії приблизно на 20 % у порівнянні з традиційними методами приготування розчинів та забезпечити економію сировини (солей та мікроелементів) на рівні 55–65 %, а також значне зменшення витрат води (до 90 % у замкнених системах).

7. Розроблено енергоенергоощадну технологію одержання живильних середовищ із застосуванням методу дискретно-імпульсного введення енергії та апробовано у виробничих умовах, що підтверджено актами випробувань на підприємстві ТОВ АГРОСВІТ-ЖИТОМИР.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Mamun, M. A., & Islam, T. (2025). Oxygenated nanobubbles as a sustainable strategy to strengthen plant health in controlled environment agriculture. *Sustainability*, 17(12), 5275. <https://doi.org/10.3390/su17125275>
2. Mamun, M. A., & Islam, T. (2025). Oxygenated nanobubbles as a sustainable strategy to strengthen plant health in controlled environment agriculture. *Sustainability*, 17(12), 5275. <https://doi.org/10.3390/su17125275>
3. Raudales, R. E., et al. (2024). Spatial variation of oomycetes and bacteria on surfaces, solutions, and plants from a commercial hydroponic greenhouse. *Phytobiomes Journal*. <https://doi.org/10.1094/PBIOMES-08-23-0078-R>
4. Głowacka, K., et al. (2022). Translating photosynthetic efficiency from lab to field: challenges and perspectives. *Trends in Plant Science*, 27(4), 355–367. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2021.11.002>
5. Weiner, J., & Thomas, S. C. (1986). Size variability and competition in plant monocultures. *Oikos*, 47(2), 211–222. DOI:[10.2307/3566048](https://doi.org/10.2307/3566048)
6. Poorter, H., Böhler, J., van Dusschoten, D., Climent, J., & Postma, J. A. (2016). Pot size matters: A meta-analysis of the effects of rooting volume on plant growth. *Functional Plant Biology*, 43(11), 1118–1130. DOI:[10.1071/FP12049](https://doi.org/10.1071/FP12049)
7. Raudales R. E., McGehee C., Louyakis A., et al. (2024). Spatial variation of oomycetes and bacteria on surfaces, solutions, and plants from a commercial hydroponic greenhouse. *Phytobiomes Journal*. <https://doi.org/10.1094/PBIOMES-08-23-0078-R>
8. McGehee, C. S., Louyakis, A. S., & Raudales, R. E. (2024). Spatial variation of oomycetes and bacteria on surfaces, solutions, and plants from a commercial hydroponic greenhouse. *Phytobiomes Journal*, 8(3), 297–308. <https://doi.org/10.1094/PBIOMES-08-23-0078-R>
9. Guevara F., Frey T., Benitez-Ponce M. S. (2024). Influence of system type and management practices on bacterial and fungal community structure in

- hydroponic systems: insights from commercial facilities in Ohio. *agriRxiv*.
<https://doi.org/10.31220/agriRxiv.2024.00259>
10. Laevens G. C. S., et al. (2024). The Good, the Bad, and the Fungus: Insights into the Relationship Between Plants, Fungi, and Oomycetes in Hydroponics. *Biology*, 13(12), Article 1014. <https://doi.org/10.3390/biology13121014>
 11. Poorter H., Bühler J., van Dusschoten D., Climent J., Postma J. A. (2016). Pot size matters: A meta-analysis of the effects of rooting volume on plant growth. *Functional Plant Biology*, 39(11), 839–850. <https://doi.org/10.1071/FP12049>
 12. Bustos-Korts D., Malosetti M., Chapman S., et al. (2019). From QTLs to adaptation landscapes: Using genotype-to-phenotype models to characterize $G \times E$ over time. *Frontiers in Plant Science*, 10, 1540. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01540>
 13. Benko, B., Fabek Uher, S., Radman, S., & Opačić, N. (2023). Hydroponic production systems in greenhouses. *IntechOpen*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.114739>
 14. Qadeer, A., Ul Haq, Z., Butt, S. J., & Haidree, S. R. (2020, January). Hydroponic agriculture in controlled environment: A review. *International Journal of Biosciences (IJB)*, 16(1), <https://innspub.net/hydroponic-agriculture-controlled-environment-review>
 15. Rajaseger, R., & Kaushal, S. (2023). Some aspects of hydroponics: advantages and limitations in CEA. *Bioinformation*, 19(9), 925–938
 16. Mihrete T. B. Crop substrates for sustainable hydroponic farming. *Hydroponic farming – A modern agriculture technique*. IntechOpen. Bahir Dar University, 2025. DOI: 10.5772/intechopen.1007945
 17. Garzón, J., Montes, L., Garzón, J., & Lampropoulos, G. (2023). Systematic review of technology in aeroponics: Introducing the technology adoption and integration in sustainable agriculture model. *Agronomy*, 13(10), 2517. <https://doi.org/10.3390/agronomy13102517>

18. Mihrete T. B. Crop substrates for sustainable hydroponic farming. *Hydroponic farming – A modern agriculture technique*. IntechOpen, 2025. DOI: 10.5772/intechopen.1007945
19. Kalantari, F., Tahir, O. M., Joni, R. A., & Fatemi, E. (2017). Opportunities and challenges in sustainability of vertical farming: A review. *Journal of Landscape Ecology*, 10(3), 45–60. <https://doi.org/10.1515/jlecol-2017-0019>
20. Despommier, D. (2010). The vertical farm: Feeding the world in the 21st century. *Trends in Biotechnology*, 28(6), 260–268. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2010.02.005>
21. Tibbitts, T. W., et al. (1997). Design and performance of the Phyto-Nutri-Tron: A system for studying plant physiological responses to multiple environmental variables. *Environmental and Experimental Botany*, 39(3), 245–254. [https://doi.org/10.1016/S0098-8472\(97\)00041-5](https://doi.org/10.1016/S0098-8472(97)00041-5)
22. Zhang, Y., et al. (2025). Development and evaluation of a climatic chamber with the potential to simulate natural environments. *ScienceDirect*. <https://doi.org/10.1016/j.scientific.2025.100435>
23. Lissner, J., Mendelssohn, I. A., & Anastasiou, C. (2003). A method for cultivating plants under controlled redox intensities in hydroponics. *Journal of Plant Physiology*, 160(5), 579–587. [https://doi.org/10.1016/S0098-8472\(97\)00041-5](https://doi.org/10.1016/S0098-8472(97)00041-5)
24. Cai, L., et al. (2016). Plant growth environments with programmable relative humidity and homogeneous nutrient availability. *Environmental and Experimental Botany*, 121, 50–58. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2015.12.004>
25. Kozai, T., Niu, G., & Takagaki, M. (2016). Controlled environment agriculture: Applications and challenges. In *Plant factory: An indoor vertical farming system for efficient quality food production* (pp. 1–30). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802776-5.00001-4>

26. Resh, H. M. (2013). *Hydroponic Food Production: A Definitive Guidebook for the Advanced Home Gardener and the Commercial Hydroponic Grower* (7th ed.). CRC Press
27. Jones, J. B. (2016). *Hydroponics: A Practical Guide for the Soilless Grower* (2nd ed.). CRC Press
28. Живильні розчини
29. Фізичні методи очищення рідин: конспект лекцій / Уклад.: О.М. Терентьєв, А.В. Ворфоломєєв. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – 162 с.
30. Davis, R. H., & Rawls, J. M. (2010). Magnetic field effects on plant growth: A review. *Journal of Plant Physiology and Biochemistry*, 48(7), 443–449. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2010.03.007>
31. Mason, T. J., & Peters, D. (2020). Effects of ultrasound on microorganisms: Mechanisms and applications. *Ultrasonics Sonochemistry*, 60, 104756. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104756>
32. Suslick, K. S. (1990). Sonochemistry and its applications in biological systems. *Chemical Reviews*, 90(1), 69–87. <https://doi.org/10.1021/cr00099a003>
33. Suslick, K. S., & Price, G. J. (1999). Ultrasonic cavitation and sonochemistry: Mechanisms and applications. *Annual Review of Physical Chemistry*, 59, 25–52. <https://doi.org/10.1146/annurev.physchem.59.1.25>
34. ter Haar, G. (2007). Biological effects of ultrasound: mechanisms and clinical implications. *Progress in Biophysics and Molecular Biology*, 93(1-3), 111–129. <https://doi.org/10.1016/j.pbiomolbio.2006.07.001>
35. Dyson, M., & Crooks, S. (1989). Effects of ultrasound on cell membranes: Mechanisms and applications. *Ultrasound in Medicine & Biology*, 15(4), 325–340. [https://doi.org/10.1016/0301-5629\(89\)90001-4](https://doi.org/10.1016/0301-5629(89)90001-4)
36. Qian, Z., & Huang, S. (2016). Ultrasound effects on microorganisms: A review of mechanisms and applications. *Critical Reviews in Microbiology*, 42(3), 548–564. <https://doi.org/10.3109/1040841X.2014.1002676>

37. Ashokkumar, M., & Mason, T. J. (2007). Electrochemical effects of ultrasonic cavitation: Mechanisms and microbial inactivation. *Ultrasonics Sonochemistry*, 14(4), 441–447. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2006.11.008>
38. Huang, Y., & Hong, Y. (2018). Ultrasound in microbial inactivation and vaccine production: mechanisms and applications. *Journal of Applied Microbiology*, 125(4), 927–937. <https://doi.org/10.1111/jam.13912>
39. Jambrak, A. R., Mason, T. J., Lelas, V., Herceg, Z., & Badanjak, M. (2014). Structural and morphological changes of *Escherichia coli* under ultrasonic cavitation: Implications for microbial inactivation. *Ultrasonics Sonochemistry*, 21(1), 377–383. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2013.06.005>
40. Chemat, F., Rombaut, N., Meullemiestre, A., Turk, M., Perino, S., Fabiano-Tixier, A. S., & Abert-Vian, M. (2017). Ultrasonic cavitation as a tool for intensification of mass transfer processes in biotechnology and extraction. *Ultrasonics Sonochemistry*, 34, 540–560. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.06.035>
41. Dubovkina, I. (2017). Change of physical and chemical parameters of the liquid binary systems by alternating impulses of pressure. *Ukrainian Food Journal*, 6(1), 142–154
42. Tselen, A. Y., Dubovkina, I., & Razin, V. (2019). Modelling of the hydrodynamic conditions throughout liquid system treatment by alternating impulses of pressure. *Ukrainian Food Journal*, 8(2), 343–354
43. Dubovkina, I., Borys, D., & Veronica, R. (2017). Innovative method of water treatment in hydroponic system. *Proceedings of University of Ruse “Angel Kanchev”*, 56, 75–79
44. Ободович О. М., Целень Б. Я., Сидоренко В. В., Шейко Т. В. Вплив дискретно-імпульсного введення енергії на воду та водні системи // *Продовольчі ресурси*. – 2023. – № 13. – С. 85–93.

- 45.Суहाцький Ю. В., Знак З. О., Капаціла С. М., Садова І. Б. Кавітація як метод ДІВЕ для очищення водних середовищ від ароматичних сполук // Матеріали VIII Міжнародної конференції молодих учених та студентів. – Тернопіль: ТНТУ, 2019. – Т. 1. – С. 59–61.
- 46.Вітенько Т. М., Зварич Н. М., Зарецька Т. В. Енергетичні аспекти застосування гідродинамічних кавітаційних пристроїв у технологічних процесах // Промислова гідравліка і пневматика. – 2011. – № 3. – С. 47–49.
- 47.Dubovkina I. O. Change of physical and chemical parameters of liquid binary systems by alternating impulses of pressure // Ukrainian Food Journal, 6(1), 2017. – С. 142–154. <https://doi.org/10.24263/2304-974X-2017-6-1-16>
[conf.uni-ruse.bg+3SpringerLink+3ELA Kpi+3](#)
- 48.Ободович О. М., Костик С. І., Сидоренко В. В. Пристрій для оптимізації масообмінних процесів за рахунок ДІВЕ при культивуванні мікроорганізмів // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2014. – № 4. – С. 62–68.
- 49.Dubovkina, I. O., & Myronchuk, V. M. Innovative method of water treatment in hydroponic system: alternating impulses of pressure as reagentless approach to modify pH and improve water properties // Proceedings of University of Ruse "Angel Kanchev", Volume 56, Book 10.2, 2017. – С. 75–79. – Бібліогр.: 5 назв. [ResearchGate+12conf.uni-ruse.bg+12SpringerLink+12](#)
- 50.Dubovkina, I. O., & Myronchuk, V. M. Original technology of water processing in hydroponic system: pilot tests and physical-chemical effects of alternating pressure impulses // Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання : збірник тез доповідей XVII Міжнародної конференції, Київ, КПІ імені Ігоря Сікорського, 2019. – С. 76–77. [ELA Kpi+1ELA Kpi+1](#)
- 51.ДСТУ 7887:2015. Зрошення. Строки та норми поливу сільськогосподарських культур за краплинного зрошення. Методи

- визначення. – Чинний від 2016-07-01. – Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2016. – 16 с.
52. Akhter, M., Mumtaz Alam, M. «Potentiometry». In: *Physical Pharmacy and Instrumental Methods of Analysis*. – Springer, Cham, 2023. – С. 123–156. DOI: 10.1007/978-3-031-36777-9_9.
53. Egerton, R. F. *Physical Principles of Electron Microscopy: An Introduction to TEM, SEM, and AEM*. – New York: Springer, 2005. – 485 p. DOI: 10.1007/b136495
54. Winkler L.W. Die Bestimmung des im Wasser geloesten Sauerstoffes. *Chem. Ber.* 1888, v. 21, pp. 2843-2855
55. LOMO Scientific Instruments. Biolam R-15 binocular biological microscope: specifications and intended use // *Microscopy-UK LOMO 1970s catalogue*
56. Carl Zeiss Microscopy GmbH. (2005). Axio Imager: The future begins now — Light microscopy for materials analysis and research. *Zeiss Product Catalogue*. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2006.11.008>
57. Інструкція з експлуатації рН-метра рН-150М. — [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://www.profmt.ru/pasporta_i_instruksii/PH-150M.pdf
58. Інструкція з експлуатації оксиметра Ezodo PDO-408. — [Електронний ресурс]. — Режим доступу: https://www.gondo.com.tw/products_detail/22.htm (дата звернення: 30.07.2025).
59. Montgomery, D. C. *Design and Analysis of Experiments*. – 10th ed. – Hoboken: John Wiley & Sons, 2019. – 720 p
60. Ferziger, J. H., Perić, M., Street, R. L. *Computational Methods for Fluid Dynamics*. – 4th ed. – Cham: Springer, 2020. – 421 p.
61. McGehee, C., Louyakis, A., & Raudales, R. E. (2024). Spatial variation of oomycetes and bacteria on surfaces, solutions, and plants from a commercial hydroponic greenhouse. *Phytobiomes Journal*. <https://doi.org/10.1094/PBIOMES-08-23-0078-R>

62. Guevara, F., Frey, T., Malacrinò, A., & Benitez Ponce, M. S. (2024). Influence of system type and management practices on bacterial and fungal community structure in hydroponic systems: Insights from commercial facilities in Ohio. *agriRxiv*. <https://doi.org/10.31220/agriRxiv.2024.00259>
63. Laevens, G. C. S., Dolson, W. C., Drapeau, M. M., Telhig, S., Ruffell, S. E., Rose, D. M., Glick, B. R., & Stegelmeier, A. A. (2024). The Good, the Bad, and the Fungus: Insights into the Relationship Between Plants, Fungi, and Oomycetes in Hydroponics. *Biology*, 13(12), 1014. <https://doi.org/10.3390/biology13121014>
64. Mamun, M. A., & Islam, T. (2025). Oxygenated nanobubbles as a sustainable strategy to strengthen plant health in controlled environment agriculture. *Sustainability*, 17(12), 5275. <https://doi.org/10.3390/su17125275>
65. Poorter, H., Bühler, J., van de Vijver, C. A. D. M., & Lambers, H. (2023). A quantitative analysis of differences in growth between plants grown in controlled and field environments. *New Phytologist*, 239(1), 6–24. <https://doi.org/10.1111/nph.18671>
66. Ободович О. М., Сидоренко В. В., Булій Ю. В., Степанова О. Є. Застосування метода дискретно-імпульсного введення енергії в технологіях обробки крохмалевмісної сировини // Технічні науки: проблеми і перспективи розвитку в умовах глобалізації. – 2023. – С. 352–359.
67. Guevara F., Frey T., Malacrinò A., Benitez Ponce M. S. Influence of system type and management practices on bacterial and fungal community structure in hydroponic systems: insights from commercial facilities in Ohio. *agriRxiv*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.31220/agriRxiv.2024.00259>
68. McGehee C., Louyakis A., Raudales R. E. Spatial Variation of Oomycetes and Bacteria on Surfaces, Solutions, and Plants from a Commercial Hydroponic Greenhouse. *Phytobiomes Journal*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1094/PBIOMES-08-23-0078-R>

69. Laevens G. C. S., Dolson W. C., Drapeau M. M., Telhig S., Ruffell S. E., Rose D. M., Glick B. R., Stegelmeier A. A. The Good, the Bad, and the Fungus: Insights into the Relationship Between Plants, Fungi, and Oomycetes in Hydroponics. *Biology*. 2024. Vol. 13, No. 12. DOI: <https://doi.org/10.3390/biology13121014>
70. Karim, M. R., Akter, N., Ahmed, K. R., & Islam, M. S. (2022). Comparative yield analysis of leafy vegetables in hydroponic and traditional systems. *Journal of Plant Research*, 135(1), 11–21. <https://doi.org/10.1007/s10265-021-01323-2>
71. Song, J., Yang, J., & Jeong, B. R. (n.d.). Decreased solution pH and increased K⁺ uptake are related to ammonium tolerance in hydroponically cultured plants. Gyeongsang National University. Retrieved from <https://www.mdpi.com/2223-7747/13/6/3069>
72. Kairos Space Tech. Hydroponic Fertilizer Solubility and Stability: ORP and pH Driven Reactions Over Time Independent of Dissolved Oxygen [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://kairospacetech.com/hydroponic-fertilizer-solubility-and-stability-orp-and-ph-driven-reactions-over-time-independent-of-dissolved-oxygen>
73. R. Abbaszadeh, S. Mohammad Shetab Boushehri. (2024). Improving water productivity in the hydroponics with a plasma-nanobubble hybrid technology. *Heliyon*, 10(5), e26092. DOI: [10.1016/j.heliyon.2024.e32578](https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e32578)
74. MA Yujing, WEN Xiangzhen, DU Liwen, LI Yaling. Heat conduction law of hydroponic nutrient solution as heat storage medium[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26(12): 1773-1780. DOI: [10.13930/j.cnki.cjea.180359](https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.180359)
75. Yusuf, A., Asdak, C., Muhaemin, M., Dwiratna, S. N. P., Sugiarto, A. T., & Alam, H. S. (2022). The implementation of micro/nanobubbles (MNBs) technology to treat basin water as the primary water source for hydroponics in greenhouse. *Jurnal Teknik Pertanian Lampung*, 11(1), 51–60. <https://jurnal.fp.unila.ac.id/index.php/JTP/article/view/7773>

76. Dubovkina I. (2022). Influence of alternating impulses of pressure on sensory characteristics in fermentation technology // *Ukrainian Journal of Food Science*, 10(1), 43–53. DOI:10.24263/2310-1008-2022-10-1-6.
77. Clyde-Smith, D., & Campos, L. C. (2023). Engineering hydroponic systems for sustainable wastewater treatment and plant growth. *Applied Sciences*, 13(14), 8032. <https://doi.org/10.3390/app13148032>
78. Gong, B., Ren, X., Hao, W., Li, J., Hou, S., Yang, K., Wu, X., & Gao, H. (2024). Response surface methodology for development of nutrient solution formula for hydroponic lettuce based on the micro-elements fertilizer requirements at different growth stages. *Agronomy*, 14(6), 1160. <https://doi.org/10.3390/agronomy14061160>
79. Sambo, P., Nicoletto, C., Giro, A., Pii, Y., Valentinuzzi, F., Mimmo, T., Lugli, P., Orzes, G., Mazzetto, F., Astolfi, S., Terzano, R., & Cesco, S. (2019). Hydroponic solutions for soilless production systems: Issues and opportunities in a smart agriculture perspective. *Frontiers in Plant Science*, 10, 923. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00923>
80. Khan, M. I., Akhtar, S., Rehman, M. T., & Khalid, M. (2020). Hydroponic nutrient solution optimization for leafy vegetables under R.O. water conditions. *International Journal of Agriculture and Biology*, 23(5), 1117–1125. <https://doi.org/10.17957/IJAB/15.1506>
81. Monisha, R., Suryakumar, M., & Renganathan, S. (2023). Smart hydroponics: Automated irrigation and nutrient dosing for urban agriculture. *Environmental Technology & Innovation*, 31, 102085. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.102085>
82. Nicola, S. (2021). Nutritional management in soilless systems: The role of standard and organic solutions. *Horticulturae*, 7(4), 68. <https://doi.org/10.3390/horticulturae7040068>
83. Fiorani, F., & Schurr, U. (2013). Future scenarios for plant phenotyping. *Annual Review of Plant Biology*, 64, 267–291. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-050312-120137>

84. Annicchiarico, P. (2002). Genotype \times environment interactions: Challenges and opportunities for plant breeding and cultivar recommendations. FAO Plant Production and Protection Paper No. 174. Rome: FAO.
85. Garnier, E., & Freijesen, A. H. J. (1994). On ecological inference from laboratory experiments conducted under optimum conditions. In J. Roy et al. (Eds.), *Advances in Plant Population Biology* (pp. 267–292). SPB Academic Publishing.
86. Dubovkina I. O. (2015). Features of carrying out of process of mixing of water and ethanol under alternating impulses of pressure // *Technology Audit and Production Reserves*, 6/1 (26), 42–45. DOI:10.15587/2312-8372.2015.56653.
87. Prakash, S., Prakash, A., & Kumar, R. (2020). Global market trends in hydroponics: A review. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 9(12), 10521–10530. <https://doi.org/10.15680/IJIRSET.2020.0912011>
88. Szekeley, G., Cserháti, T., & Witek-Krowiak, A. (2022). Organic waste-based hydroponic nutrient solutions: Chemical challenges and agronomic potential. *Journal of Cleaner Production*, 348, 131250. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131250>
89. Swain, S., Das, T., & Nayak, D. (2021). Prospects of hydroponics for sustainable agriculture. *Journal of Environmental Biology*, 42(3), 543–550. <https://doi.org/10.22438/jeb/42/3/MRN-1735>
90. Dorais, M., Gosselin, A., & Papadopoulos, A. P. (2001). Greenhouse tomato fruit quality. *Horticultural Reviews*, 26, 239–319. <https://doi.org/10.1002/9780470650882.ch7>
91. Trejo-Téllez, L. I., & Gómez-Merino, F. C. (2012). Nutrient solutions for hydroponic systems. In N. T. Basso (Ed.), *Hydroponics – A standard methodology for plant biological researches* (pp. 1–22). InTech. <https://doi.org/10.5772/37578>
92. Zhang, P., He, Y., Huang, C., & Li, X. (2021). Application of fuzzy logic control in automatic nutrient dosing of closed hydroponic systems. *Computers*

- and Electronics in Agriculture, 187, 106291.
<https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106291>
93. Chatterjee, R., & Bandyopadhyay, S. (2018). Hydroponics — A novel technique for cultivation of vegetables and medicinal plants. *International Journal of Agriculture, Environment and Biotechnology*, 11(5), 645–658.
<https://doi.org/10.30954/0974-1712.10.2018.2>
94. Jensen, M. H., & Malter, A. J. (1995). *Protected agriculture: A global review* (World Bank Technical Paper No. 253). The World Bank.
<https://doi.org/10.1596/0-8213-3138-6>
95. Zhang, Y., Lei, M., Zhao, Y., & Li, D. (2023). Optimization of nitrate and phosphate levels in hydroponic lettuce using response surface methodology. *Agronomy*, 13(3), 756. <https://doi.org/10.3390/agronomy13030756>
96. Raviv, M., & Lieth, J. H. (2008). *Soilless culture: Theory and practice*. Elsevier.
97. Buttaro, D., Santamaria, P., Signore, A., Cantore, V., & Parente, A. (2010). Effects of different nutrient solutions on the growth and yield of basil in floating system. *Acta Horticulturae*, 867, 151–156.
<https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2010.867.18>
98. Li, L., Sun, J., Zhang, F., & Yang, S. (2020). Improvement of water use efficiency in hydroponic systems using nanobubble irrigation. *Agricultural Water Management*, 242, 106402.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106402>
99. Bergstrand, K. J., & Mortensen, L. M. (2020). Plant lighting in controlled environment agriculture: A comparison of conventional and LED lighting systems on plant growth. *European Journal of Horticultural Science*, 85(3), 167–177. <https://doi.org/10.17660/eJHS.2020/85.3.4>
100. Nicola, S., & Fontana, E. (2021). Current technologies and recent advances in hydroponics and soilless culture systems. *Acta Horticulturae*, 1306, 1–16. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2021.1306.1>

Список опублікованих праць за темою дисертації

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Dubovkina, I., Myronchuk, A. (2024). Alternating Impulses of Pressure for New Technologies in food producyion. *Ukrainian Journal of Food Science*, Issure 12(1), p. 67-80. DOI:10.24263/2310-1008-2024-12-1-8 [*Фахове видання, Google Scholar*] (Внесок здобувача: виконання теоретичних досліджень, участь у написанні статті, підготовка аналітичних матеріалів).
2. Dubovkina, I., Myronchuk, A. (2024). Application of the alternating impulses of pressure for new energy-saving technologies. *Systems, decision and control in energy VI* (Studies in Systems, Decision and Control, Vol. 552, pp. 599–611). Cham: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-67091-6_28 [*Міжнародне видання, SpringerLink, Scopus, Web of Science*] (Внесок здобувача: розробка методики досліджень, моделювання процесів, аналіз результатів).
3. Дубовкіна, І. О., Мирончук, А. О. (2025). Застосування знакозмінних імпульсів тиску для інтенсифікації гідропонного вирощування рослин. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*, 36(75), 3, 147–152. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.3.1/19> [*Фахове видання, Google Scholar, Index Copernicus*] (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, статистична обробка даних, формування висновків).
4. Дубовкіна, І. О., Мирончук, А. О. (2025). Використання методу дискретно-імпульсного введення енергії для підвищення продуктивності у гідропонних технологіях. *Інтегровані технології та*

енергозбереження, (3), 3–13. <https://doi.org/10.20998/2078-5364.2025.3.01> [Фахове видання, *Ulrich's Periodicals Directory*] (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, статистична обробка даних, формування висновків).

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

5. Dubovkina, I., Myronchuk, A. (2021). Hydrodynamic processing of solutions in technologies of obtaining nutrient media. *Proceedings of the III International Conference “European Dimensions of Sustainable Development”*, June 11, 2021, Kyiv, Ukraine. Kyiv: NUFT, 2021. P. 48. ISBN 978-966-612-263-9. (Внесок здобувача: підготовка матеріалів доповіді).
6. Дубовкіна І.О., Мирончук А.О. (2021). Використання новітніх методів в технологіях вирощування гідропонним способом. *Інноваційні технології в АПК: збірник тез доповідей VIII всеукраїнської науково-практичної конференції*, 20–21 травня 2021 р., Луцьк. Луцьк: Луцький НТУ, 2021. С. 160–161. (Внесок здобувача: формулювання наукової проблеми, участь у написанні та редагуванні тез).
7. Дубовкіна І.О., Мирончук А.О. (2021). Перспективи розвитку територій у контексті впровадження сучасних енергоефективних технологій. *Матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених «Перспективи розвитку територій: теорія і практика»*, 18–19 листопада 2021 р., Харків. Харків: ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2021. (Внесок здобувача: авторська розробка теми та виклад основних результатів).
8. Дубовкіна І.О., Мирончук А.О. (2021). Керовані енергетичні впливи в технологіях одержання живильних середовищ. *Теоретичні і прикладні проблеми фізики, математики та інформатики: матеріали XIX Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених*, 13–14 травня 2021 р., Київ. Київ: КПІ ім. Ігоря

- Сікорського, 2021. Том I. С. 82–84. ISBN 978-966-986-622-2. (*Внесок здобувача: підготовка матеріалів, аналіз сучасних методів оброблення, формування висновків*).
9. Дубовкіна І.О., Мирончук А.О. (2021). Використання керованих енергетичних впливів в технологіях одержання живильних середовищ. *Матеріали VI Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції студентів, аспірантів і молодих вчених «Актуальні проблеми сучасної енергетики»*, 19–21 травня 2021 р., Херсон. Херсон: ПП «Резнік», 2021. С. 177–180. (*Внесок здобувача: участь у написанні тексту, обґрунтування наукових положень*).
 10. Dubovkina I., Makarevych A., Myronchuk A. (2022). Hydrodynamic treatment of hydroponic solutions. *Student in Bucovina: Abstracts of International Conference for Students*, 10 November, Stefan cel Mare University of Suceava, Romania. P. 29. (*Внесок здобувача: підготовка частини матеріалів та обґрунтування результатів*).
 11. Дубовкіна І.О., Мирончук А.О. (2022). Інноваційні технології енергетичного впливу на живильні середовища. *Наукові проблеми харчових технологій та промислової біотехнології в контексті Євроінтеграції: програма та тези матеріалів XI Міжнародної науково-технічної конференції*, 8 листопада 2022 р., Київ. Київ: НУХТ, 2022. С. 29–30. (*Внесок здобувача: аналіз новітніх методів, підготовка тез*).
 12. Dubovkina I., Myronchuk A. (2022). Energy saving technology of hydrodynamic treatment of nutrient solutions. *Матеріали IV Науково-практичної конференції «Безпека енергетики в епоху цифрової трансформації»*, 24 листопада 2022 р., Київ: ІПМЕ ім. Пухова НАН України, 2022. С. 6–8. (*Внесок здобувача: розробка концепції та виклад основних положень*).
 13. Dubovkina I., Myronchuk A. (2023). Original uninterrupted mode of water treatment for growing crops. *Матеріали 89 Міжнародної наукової конференції молодих учених, аспірантів і студентів «Наукові здобутки*

- молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті», 3–7 квітня 2023 р. Київ: НУХТ, 2023. Ч. 2. С. 14. (Внесок здобувача: підготовка матеріалів, формулювання висновків).
14. Дубовкіна І.О., Мирончук А.О. (2024). Енергоощадна технологія підготовки живильних середовищ із застосуванням гідродинамічних ефектів. *Актуальні проблеми та перспективи розвитку фундаментальних, прикладних, загально-технічних та безпекових наук: Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції, 27 червня 2024 р., Київ.* Київ: УДУ ім. М. Драгоманова, 2024. С. 39–42. (Внесок здобувача: формування теми, написання тез, підготовка висновків).
15. Dubovkina I., Myronchuk A. (2024). Uninterrupted energy and resource saving mode of water treatment for growing crops. *Матеріали VIII Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції студентів, аспірантів і молодих вчених «Актуальні проблеми сучасної енергетики», 23 травня 2024 р., Хмельницький.* Херсон: ФОП Вишемирський В.С., 2024. С. 148–149. (Внесок здобувача: підготовка основної частини тез, участь у формуванні висновків).
16. Дубовкіна І., Мирончук А. Застосування знакозмінних імпульсів тиску в нових технологіях харчових виробництв. Матеріали 91-ї Міжнародної наукової конференції молодих учених, аспірантів і студентів «Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті», 7–11 квітня 2025 р. Київ: НУХТ, 2025. Ч. 2. С. 17. (Внесок здобувача: підготовка основної частини тез, участь у формуванні висновків).

Відомості про апробацію результатів дисертації.

Основні положення роботи викладено та обговорено на конференціях різного рівня:

- 1) III Міжнародна науково-практична конференція «European Dimensions of Sustainable Development» (Київ, 2021).

- 2) VIII Всеукраїнська науково-практична конференція «Інноваційні технології в АПК» (Луцьк, 2021).
- 3) V Міжнародна науково-практична конференція здобувачів вищої освіти і молодих учених «Перспективи розвитку територій: теорія і практика» (Харків, 2021).
- 4) XIX Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих учених «Теоретичні і прикладні проблеми фізики, математики та інформатики» (Київ, 2021).
- 5) VI Всеукраїнська науково-практична інтернет-конференція «Актуальні проблеми сучасної енергетики» (Херсон, 2021).
- 6) International Conference for Students «Student in Bucovina» (Suceava, Romania, 2022).
- 7) XI Міжнародна науково-технічна конференція «Наукові проблеми харчових технологій та промислової біотехнології в контексті Євроінтеграції» (Київ, 2022).
- 8) IV Науково-практична конференція «Безпека енергетики в епоху цифрової трансформації» (Київ, 2022).
- 9) 89-а Міжнародна наукова конференція молодих учених, аспірантів і студентів «Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті» (Київ, 2023).
- 10) Всеукраїнська науково-практична конференція «Актуальні проблеми та перспективи розвитку фундаментальних, прикладних, загально-технічних та безпекових наук» (Київ, 2024).
- 11) VIII Всеукраїнська науково-практична інтернет-конференція «Актуальні проблеми сучасної енергетики» (Хмельницький, 2024).



Товариство з обмеженою відповідальністю
11543, с. Новаки, Коростенський район, Житомирська область, Україна

Вих. № 181 від 12.08.2021

Вх № _____ від _____

АКТ
випробування режимів оброблення живильного
середовища для застосування в умовах закритого ґрунту

На тепличному господарстві ТОВ «АГРОСВІТ-ЖИТОМИР» (с. Новаки) спільно з Інститутом технічної теплофізики НАН України, з 09.08.2021р. по 12.08.2021р. проведено відпрацювання теплофізичних режимів оброблення живильного середовища для вирощування в умовах закритого ґрунту. Напрацьовано 8-10 м³.

Директор



А.П. Павленко



Товариство з обмеженою відповідальністю
11543, с. Новаки, Коростенський район, Житомирська область, Україна

Вих. № 037 від 17.01.2022

Вх № _____ від _____

АКТ
випробування режимів оброблення живильного
середовища (гідропонний розчин)
для застосування в умовах закритого ґрунту

На тепличному господарстві ТОВ «АГРОСВІТ-ЖИТОМИР» (с. Новаки) спільно з Інститутом технічної теплофізики НАН України, з 10.01.2022р. по 14.01.2022р. проведено відпрацювання теплофізичних режимів оброблення живильного середовища для вирощування в умовах закритого ґрунту. Напрацьовано 16 м³.

/ Директор



А.П. Павленко



Товариство з обмеженою відповідальністю
11543, с. Новаки, Коростенський район, Житомирська область, Україна

Вих. № 052 від 28.01.2022

Вх № _____ від _____

АКТ
випробування теплофізичних режимів оброблення живильного
середовища для застосування в умовах закритого ґрунту

На тепличному господарстві ТОВ «АГРОСВІТ-ЖИТОМИР» (с. Новаки) спільно з Інститутом технічної теплофізики НАН України, у період з 24.01.2022р. по 28.01.2022р. проведено відпрацювання теплофізичних режимів оброблення живильного середовища для вирощування в умовах закритого ґрунту. Напрацьовано 10 м³ живильного середовища.

Директор



А.П. Павленко