



Стаднік М.І.
д.т.н., професор

Бурлака С.А.
д.ф., ст. викладач

Луц П.М.
к.т.н., ст. викладач

**Вінницький національний
аграрний університет**

Stadnik M.
Doctor of Technical Sciences,
Professor

Burlaka S.
Ph.D., Senior Lecturer

Luts P.
Ph.D., Senior Lecturer

**Vinnitsia National Agrarian
University**

УДК 631.3:519.876.5:639.3
DOI: 10.37128/2306-8744-2024-4-2

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМОДІЇ ВОДНОГО ТА ПОЖИВНОГО БАЛАНСУ В ЗАМКНУТИХ ГІДРОПОНІЧНИХ СИСТЕМАХ

У статті представлено дослідження, спрямоване на моделювання взаємодії водного та поживного балансу в гідропонічних системах, які набувають популярності як екологічно раціональний та високоефективний спосіб вирощування рослин без використання ґрунту. Гідропонічні системи забезпечують оптимальне постачання рослин поживними речовинами через водний розчин, який підтримується у замкненому циклі, що дозволяє зменшити обсяг води і добрив у порівнянні з традиційним сільським господарством. Проте ефективність таких систем значною мірою залежить від точного регулювання водного і поживного балансів, що забезпечує належний розвиток рослин та оптимізує витрати ресурсів.

Метою даного дослідження є розробка комплексної моделі, яка враховує динаміку водного та поживного середовища гідропонічної системи та дозволяє прогнозувати потреби рослин у ключових елементах живлення. У статті розглядаються ключові параметри, що впливають на поживний баланс у гідропоніці, зокрема рівень рН, концентрації основних мікро- та макроелементів, швидкість засвоєння поживних речовин рослинами, випаровування та транспірація, а також зміни температури і відношення поживних речовин у розчині. Для досягнення стабільного водного та поживного балансу необхідно враховувати всі ці фактори та коригувати параметри системи залежно від зовнішніх умов та стадії розвитку рослин.

Методологія дослідження базується на поєднанні математичного моделювання та експериментальних даних, що дозволяє створити адаптивну модель гідропонічної системи. Стаття детально описує структуру моделі, яка включає вхідні змінні (температура, вологість, концентрація поживних речовин), процеси обміну (поглинання та транспірація) та вихідні змінні (оптимальна концентрація поживних елементів). Результати моделювання дозволяють здійснювати контроль і налаштування поживного розчину, мінімізуючи витрати води і добрив та забезпечуючи максимальну врожайність рослин.

Практичне значення розробленої моделі полягає у можливості її використання для управління гідропонічними фермами різного масштабу, від домашніх установок до промислових аграрних підприємств.

Ключові слова: гідропонний метод, поживний розчин, коренева система, субстрат, енергоефективність, продуктивність..



Вступ. Сучасне сільське господарство перебуває під значним тиском через зростання населення, обмеженість земельних та водних ресурсів, а також необхідність зниження екологічного навантаження на природне середовище. Ці фактори стимулюють розвиток інноваційних методів агровиробництва, які дозволяють підвищити продуктивність, зберігаючи екологічну стійкість. Одним із таких методів є гідропоніка — система вирощування рослин без ґрунту, в якій рослини отримують поживні речовини безпосередньо з водного розчину. Гідропонічні системи пропонують безліч переваг: вони дозволяють суттєво зменшити витрати води та добрив, мінімізують ризик хвороб ґрунту та забезпечують контрольовані умови вирощування, що є особливо важливим у регіонах з обмеженими природними ресурсами та важкими кліматичними умовами.

Однак, незважаючи на численні переваги, ефективність гідропонічних систем значною мірою залежить від ретельного контролю за водним і поживним балансом. Для нормального розвитку рослин необхідно забезпечити стабільні концентрації основних макро- та мікроелементів, таких як азот, фосфор, калій, магній та інші, а також підтримувати оптимальні умови для кореневої системи, включаючи рівень рН, температуру і ступінь аерації водного розчину. Відхилення від оптимальних значень можуть призвести до стресових умов для рослин, уповільнення їх росту або навіть до повної втрати врожаю. Окрім того, постійні зміни зовнішніх факторів, таких як температура повітря, вологість та швидкість випаровування, створюють додаткові виклики для управління системою.

Сьогодні важливим завданням для дослідників є розробка комплексного підходу до моделювання та управління гідропонічними системами. Такий підхід дозволить не лише оптимізувати витрати води та поживних речовин, але й створити умови для підтримання стабільного водного та поживного балансу, що в результаті підвищить ефективність та рентабельність цих систем. У контексті глобальних екологічних викликів створення таких моделей є важливим кроком до підвищення стійкості аграрного сектору.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Останні дослідження в галузі гідропоніки та управління поживним середовищем у гідропонічних системах демонструють суттєвий прогрес у напрямку оптимізації використання води та поживних речовин. Зокрема, актуальним є вивчення моделей, що забезпечують ефективний контроль за рівнем поживних елементів у розчинах, а також адаптивних технологій, які дають змогу підтримувати стабільний ріст рослин у різних умовах.

Більшість наукових праць, присвячених гідропоніці, зосереджені на розробці математичних

моделей і контролюючих алгоритмів, що дозволяють оптимізувати вміст поживних речовин у водному середовищі. Так, дослідження Wang et al. (2018) демонструють результати застосування динамічного моделювання для відстеження рівня азоту та фосфору у розчині, а також описують алгоритми корекції складу розчину на основі споживання поживних речовин рослинами. Результати цього дослідження доводять, що адаптивний підхід до регулювання складу поживного розчину є ефективним і дозволяє підвищити врожайність на 15–20%, що є вагомим показником для комерційного сільського господарства.

Інші дослідження, зокрема праця Singh et al. (2020), висвітлюють важливість автоматизації та використання сенсорних технологій у гідропонічних системах. Сучасні датчики, які контролюють рівень рН, електропровідність та концентрацію поживних речовин у розчині, дозволяють збирати дані в реальному часі, що значно підвищує точність управління поживним балансом. Розроблені на основі таких даних моделі здатні не лише підтримувати оптимальний рівень поживних речовин, але й адаптуватися до змін умов середовища, таких як коливання температури чи освітленості, які суттєво впливають на поглинання поживних речовин.

Окремим напрямком досліджень є вивчення взаємодії між параметрами водного та поживного балансів і ростом рослин у гідропонічних системах. Дослідження Martínez et al. (2019) демонструють, що існує значний вплив співвідношення між основними макроелементами (N-P-K) на швидкість росту та продуктивність рослин. Вони також звертають увагу на проблему нестачі мікроелементів, які часто випадають із поля зору під час налаштування поживного розчину. Martínez et al. розробили модель, яка враховує як макро-, так і мікроелементи, що дало змогу підвищити точність прогнозування росту рослин і покращити якість врожаю. Це дослідження підкреслює необхідність комплексного підходу до моделювання гідропонічних систем, де враховуються всі елементи поживного балансу.

Незважаючи на досягнуті успіхи, більшість досліджень не охоплюють одночасно динамічні зміни обох компонентів системи — водного та поживного балансів, а також їхню взаємодію в реальних умовах експлуатації. Саме ця комплексна взаємодія є ключовою для забезпечення стійкого та збалансованого зростання рослин. Існуючі моделі часто недостатньо враховують вплив факторів середовища, таких як вологість, випаровування і транспірація, які можуть значно впливати на водний баланс у системі.

Метою досліджень розробка комплексної математичної моделі, яка дозволить прогнозувати і контролювати водний і поживний баланс у гідропонічній системі, враховуючи динамічні зміни у



середовищі та потреби рослин на різних етапах їх розвитку. Модель орієнтована на інтеграцію таких факторів, як споживання поживних речовин, випаровування, транспірація та інші процеси обміну, що впливають на рівень поживних елементів у розчині.

Матеріали і методи. У дослідженні використовували гідропонічну систему закритого типу, в якій поживні речовини постачаються рослинам через водний розчин, що циркулює у замкнутому циклі. Для забезпечення точності експерименту була створена автоматизована гідропонічна установка з контролем параметрів розчину, яка включала ємність для зберігання розчину, насоси для циркуляції та подачі води, систему фільтрації, а також датчики для вимірювання ключових показників середовища, таких як рівень рН, електропровідність, концентрація поживних речовин і температура розчину.

У гідропонічних системах вирощування рослини отримують необхідні поживні речовини з гідропонічного живильного розчину. Багато комерційних виробників гідропоніки регулюють живильний розчин за допомогою трьохкомпонентної системи добрив, де комбінація резервуарів для зберігання підтримує відповідний рівень поживних речовин. Цей метод популярний, оскільки деякі добрива мають тенденцію до випадання в осад при надто високій концентрації. Виробники додають добрива у свіжу воду в низьких концентраціях, щоб усі елементи залишалися доступними для їхніх культур. У великих гідропонічних системах виробники можуть відправляти живильний розчин до лабораторії для аналізу або купувати дороге обладнання для тестування концентрацій окремих елементів. Результати тестів допомагають виробникам керувати живильним розчином. Проте придбання сенсорів або відправка необхідних зразків у лабораторію є дорогими, тому багато виробників покладаються на прості методи для моніторингу свого живильного розчину.

Вимірюючи електропровідність (ЕС) живильного розчину, виробники можуть отримати загальне уявлення про кількість добрив, які вони постачають своїм рослинам. Використання вимірювань ЕС є зручним і швидким методом оцінки кількості солей у живильному розчині. Це показник, який широко застосовується гідропонічними виробниками. Сьогодні на ринку існує багато різних сортів салату, які відрізняються за розміром, швидкістю росту та типом. Імовірно, що необхідний рівень ЕС для оптимального росту може варіюватися залежно від сорту. Оптимальний ЕС також може залежати від системи виробництва через різницю в об'ємі розчину, який використовується, і співвідношенні коренів, занурених у воду. Загальні висновки для гідропонічного вирощування салату показують, що рівень ЕС від 1,0 до 2,0 дСм·м⁻¹ є найкращим для оптимального росту. Високий рівень ЕС пов'язаний з

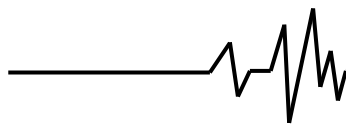
осмотичним стресом, і зміни ЕС безпосередньо корелюють з біомасою та концентрацією метаболітів. Часто експерименти для визначення оптимальних рівнів ЕС включають лише декілька сортів салату. Увімкнення більшої кількості сортів в експерименти необхідне для узагальнення оптимального ЕС для гідропонічного виробництва салату.

Було проведено два експерименти. Перший експеримент мав на меті вивчити взаємодію між рівнями ЕС та системами виробництва на продуктивність кількох сортів салату в теплиці протягом літа/осені. У другому експерименті різні сорти салату були протестовані на ріст за оптимального, м'якого та помірного рівнів холодного стресу в камері для вирощування.

Експеримент 1. Дослідження проводилось у теплиці влітку. Середня температура навколишнього середовища в теплиці під час експерименту становила 24,5 (± 0,39)°C вдень та 22,5 (± 0,35)°C вночі, з максимальною температурою 29,2°C та мінімальною температурою 16,7°C (рисунок 3.1). Система PRIVA в теплиці була налаштована на підтримку температури навколишнього середовища між 26,7°C вдень і 18,3°C вночі (рисунок 3.1). Однак температура часто перевищувала межі, які могли підтримати випарні охолоджувальні панелі, тому для зниження температури використовували сонячні штори. Коли температура в теплиці перевищувала 32,2°C, на теплицю накривали затінювальні полотна, щоб заблокувати додаткове світло і підтримати оптимальну температуру. Це призвело до значно нижчого, ніж зазвичай, DLI для експерименту (рисунок 3.1). Середнє значення освітленості протягом доби становило 10,5 (± 0,79) моль·м⁻²·день⁻¹. Мінімальний DLI в теплиці склав 4 (± 0,69) моль·м⁻²·день⁻¹, а максимальний — 15,4 (± 1,11) моль·м⁻²·день⁻¹.

Експеримент був спроектований як роздільна ділянка. Під час основного етапу було проведено чотири обробки поживним розчином, де рівень ЕС підтримувався на рівні 1,3, 2,0, 2,9 або 3,9 дСм·м⁻¹ (110, 205, 325 і 460 ppm N). На другому рівні експерименту використовувались дві різні виробничі системи, одна з яких постачала живильний розчин до системи CFT та двох каналів NFT. На кінцевому етапі порівнювались 24 різні сорти салату. Було вирощено червоні та зелені сорти салату, що належать до основних груп, включаючи листовий салат, ромен, листовий та дубоволистий салат.

Рівні ЕС для різних обробок включали ЕС водопровідної води (0,72 дСм·м⁻¹). Рівні ЕС змінювались в залежності від дня експерименту через варіації у швидкості випаровування та поглинання рослинами. Окрім ЕС водопровідної води, ЕС поживного розчину, що подавали, становив приблизно 0,6, 1,3, 2,2 і 3,2 дСм·м⁻¹ для ЕС-обробок 1,3, 2,0, 2,9 і 3,9 дСм·м⁻¹ відповідно. Рівень ЕС підтримувався двічі на тиждень шляхом додавання свіжої води або додаткового поживного розчину. Підтримуваний рівень ЕС не враховував



початковий ЕС водопровідної води. Значення рН підтримувались в межах 5,5-6,5 за допомогою додавання 85% сірчаної кислоти, коли це було необхідно. Загалом було використано 48 систем NFT та 48 CFT у різних методах обробки. Одна система NFT або CFT містила 16 рослин салату. Сорти салату були обрані шляхом консультування з місцевими гідропонними виробниками та насінневими компаніями для отримання рекомендацій. Сорти вибирались за такими критеріями: тип (листовий, Butterhead, Oakleaf і Romaine), колір (червоний або зелений), придатність для гідропоніки, дні збору врожаю та популярність серед виробників. Насіння було придбано у Johnny's Selected Seeds та Paramount Seeds. Вибрані сорти наведені в таблиці 1.

Таблиця 1. Популярні сорти, вибрані за кольором і типом.

Культивар (Lactuca sativa L.)	Тип	Колір
Адріана	Баттерхед	Зелений
Buttercrunch (Bc)	Баттерхед	Зелений
Рекс (Rx)	Баттерхед	Зелений
Наталія (Nt)	Баттерхед	Зелений
Алкінд (Al)	Баттерхед	Червоний
Salanova Red Butterhead (SRB)	Баттерхед	Червоний
Скіфос (Sk)	Баттерхед	Червоний
Walkmann's Dark Green (WDG)	листок	Зелений
Чорний Сімпсон (BSS)	листок	Зелений
Невада (Nv)	листок	Зелений
Червоні вітрила (RS)	листок	Червоний
черокі (Ch)	листок	Червоний
New Red Fire (NRF)	листок	Червоний
Кедр (Ce)	Oakleaf	Зелений
Salanova Green Oakleaf (SGO)	Oakleaf	Зелений
Навара (Nr)	Oakleaf	Червоний
Salanova Red Oakleaf (SRO)	Oakleaf	Червоний
Червона салатниця (RSB)	Oakleaf	Червоний
Сальвій (Sl)	Ромен	Зелений
драгун (д-р)	Ромен	Зелений
Амадей (Am)	Ромен	Зелений
Брін (Br)	Ромен	Червоний
Intred (In)	Ромен	Червоний
Трухас (Tr)	Ромен	Червоний

Експеримент II: Дослідження

проводилось у двох камерах для вирощування (модель E15). Насіння пророщували в кубиках мінеральної вати при температурі 21,1°C протягом семи днів перед пересадкою в

спеціальну виробничу систему CFT. Коріння салату занурювали приблизно на 5 см у поживний розчин, який безперервно рециркулював із резервуару в лотки за допомогою занурювального насоса (AquaPique, 190 LPH). Пророщену розсаду поміщали в сітчасті чашки розміром 2,5 см і встановлювали в систему CFT. Розсаду 24 сортів салату (табл. 3.1) вирощували при трьох різних температурах навколишнього повітря (10, 15,6 і 21,1°C). Рослини вирощували, використовуючи поживний розчин з ЕС 1,8 дСм·м⁻¹ (включаючи ЕС зрошувальної води) та рівнем рН 5,5-6,5. Живильний розчин замінювали щотижня. Рослини отримували близько 10,4 моль·м⁻²·день⁻¹ світла протягом 16-годинного фотоперіоду під час експерименту. Після 28 днів рослини збирали для визначення маси свіжої та сухої біомаси на кожній ділянці з різними температурами повітря. Дані аналізували за допомогою загальної лінійної моделі статистичного програмного забезпечення (SAS, Cary, NC) з відповідними умовами помилок для загальних та розділених графіків, які порівнювались за допомогою різниці Тьюкі (HSD), де P < 0,05 вважалося статистично значущим.

Результати досліджень та їх обговорення. Експеримент I. Між системою виробництва та рівнем ЕС спостерігалась значна взаємодія щодо сухої ваги пагонів. Хоча не було виявлено відмінностей у сухій вазі між виробничими системами на жодному з рівнів ЕС, зменшення сухої ваги було більш вираженим у системі NFT порівняно з CFT при підвищенні рівня ЕС. Оптимальне зростання рослин салату спостерігалось при рівнях ЕС від 1,3 до 2,0 дСм·м⁻¹. Суха вага салату при рівнях ЕС 1,3 та 2,0 дСм·м⁻¹ була статистично подібною, але значно більшою порівняно з варіантами з вищим рівнем ЕС. Це можна пояснити осмотичним стресом, який спричиняється високою концентрацією солі, згідно з дослідженнями. Висока концентрація солей добрив у поживному розчині запобігає поглинанню води, що з часом гальмує ріст. При такому високому рівні ЕС рослини також контактують із високими концентраціями поживних речовин, що може призводити до токсичних ефектів. Токсичність поживних речовин при високому ЕС зазвичай проявляється у вигляді крайового некрозу, зменшення швидкості росту та високих концентрацій поживних речовин, які блокують поглинання інших елементів (рис. 1).

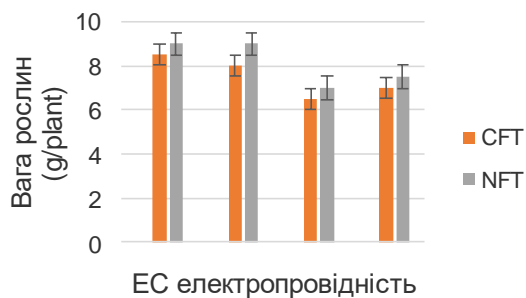


Рис. 1. Середня суха вага при виробництві NFT і CFT від електропровідності. Графіки показують значущість на рівні PS ($P < 0,05$) і на рівні ЕС ($P < 0,001$).

Експеримент 2. Спостерігалась значна взаємодія між температурною обробкою та сортом на свіжу масу (табл. 3.2). Різниця у свіжій вазі між сортами збільшувалась із підвищенням температури обробки. Деякі сорти краще себе показували при нижчих температурах, ніж інші. Свіжа маса таких сортів, як Драгун та Нью Ред Файр, була значно вищою, ніж у інших, при помірно низькій температурі (10 °C). Сорти салату «Драгун», «Адріана» та «Темно-зелений» Вальдманна мали значно більшу свіжу масу при більш м'якій температурній обробці (15,5 °C).

Сорти *Salvius*, *Waldmann's Dark Green* та *Adriana* показали найкращі результати за оптимальних умов (21,1 °C). Очевидно, що розмір рослин сорту «Адріана» та «Темно-зелений» Вальдманн за оптимальної температури (21,1 °C) загалом корелював із їхньою здатністю давати більшу свіжу масу пагонів при неоптимальних температурах. *Dragoon* і *New Red Fire* демонстрували найвищу свіжу масу при холодній обробці, але з підвищенням температури ці сорти більше не були найкращими виробниками свіжої маси. Це свідчить про те, що *Dragoon* і *New Red Fire* мають кращу холодостійкість порівняно з такими сортами, як *Adriana* чи *Salvius*.

New Red Fire — один із небагатьох сортів, що добре себе показує при низьких температурах. Оскільки «Драгун» був найбільш холодостійким, його більша компактність головки може захищати меристему від низьких температур, виступаючи як форма ізоляції. Сорти *Butterhead* і *Oakleaf* мають широку і коротку форму, що утримує їх верхівкову меристему під впливом навколишнього повітря набагато довше, ніж сорти ромен. Різні температурні обробки значно вплинули на рослини, що підтверджено в попередніх дослідженнях. Для всіх сортів рослини, вирощені при вищих температурах, росли

краще, ніж при нижчих. Рослини, вирощені при помірно низькій температурі, не досягли комерційного розміру після 28 днів росту. Це свідчить про необхідність підтримувати хоча б 15,5 °C під час вирощування, з оптимальним зростанням при 21,1 °C.

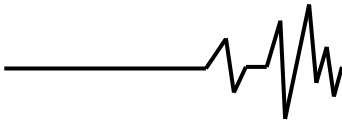
Таблиця 2. Порівняння середньої ваги пагонів 24 сортів салату за трьох температур періоду росту 10, 15,5 та 21,1 °C ($P < 0,01$)

Сорти	Температура (°C)		
	10	15,5	21,1
Адріана	4,3(1,60)	52,5(19,81)	150,6(9,32)
Buttercrunch	3,5(1,75)	33,6(6,18)	63,4(5,59) D
Наталя	2,5(1,16)	26,7(9,13)	29,2(2,58) E
Рекс	3,5(1,16)	31,2(2,83)	23,3(5,21) Ф
Чорний	2,0(0,58)	39,5(13,39)	127,5(6,02)
Невада	3,4(1,97)	28,2(3,51)	40,8(0,85) E
Темно-	3,1(1,61)	42,3(5,76)	129,2(18,48)
Кедр	2,9(0,9)Б	31,4(3,32)	86,4(3,85) С
Salanova	1,9(0,54)	12,4(3,85)	37,6(4,94) E
Амадей	2,7(1,28)	11,6(4,86)	27,4(7,10) E
драгунський	5,9(2,57)	53,0(3,48)	67,3(6,41) D
Сальвій	3,9(1,16)	28,1(13,54)	130,7(8,89)
Алкінд	1,9(0,54)	20,2(3,7) Б	40,4(3,24) E
Саланова	2,1(0,93)	14,7(2,14)	18,4(2,52) G
Скайфос	3,4(1,44)	18,0(4,68)	31,9(1,89) E
Черокі	4,0(1,47)	17,5(2,51)	31,2(4,42) E
Новий	5,5(2,24)	27,2(5,22)	91,6(2,61) Б
Червоні	4,3(1,61)	53,4(10,23)	88,5(3,05) Б
Червоний	2,5(0,66)	16,6(2,14)	31,6(1,83) E
Навара	2,7(1,11)	11,1(4,55)	28,3(2,17) E
Salanova Red	0,7(0,01)	15,1(2,78)	20,7(4,5) Ф
Брін	2,5(0,66)	19,9(2,26)	95,6(26,54)
Інтред	2,4(1,05)	8,5 (1,53)	19,9(2,59) G
Тручас	2,2(0,91)	16,3(3,17)	25,0(1,06) E

Сортування за температурою показує, що з підвищенням температури, в цілому, свіжу масу зростає у більшості сортів салату. Однак є винятки, де деякі сорти, зокрема «Драгунський» і «Адріана», демонструють стабільно високу масу при різних температурах.

Температура 21,1°C (оптимальна для багатьох сортів) приносить найкращі результати для таких сортів, як «Адріана», «Чорний Сімпсон», «Темно-зелений Вальдмана» та інші.

При температурі 10°C більшість сортів демонструє найменшу свіжу масу, що є очікуваним, оскільки холод може гальмувати ріст рослин. Наприклад, сорт «Salanova Green Oakleaf» має найменшу масу при 10°C (1,9 г),



що може вказувати на слабку холодостійкість.

Високий показник у сорту «Драгунський» (5,9 г) при 10°C може свідчити про його гарну холодостійкість.

Для більшості сортів температура 15,5°C також є хорошим варіантом для росту, хоча й поступається 21,1°C. Наприклад, сорти «Адріана», «Темно-зелений Вальдмана», «Чорний Сімпсон» мають високі показники при 21,1°C, а при 15,5°C результат все одно залишається значним.

Сорти, такі як «New Red Fire», «Темно-зелений Вальдмана» та «Чорний Сімпсон», досягають найбільших результатів при оптимальних температурах, що підкреслює їх адаптацію до тепліших умов.

Висновки та напрямки подальших досліджень. У нашому експериментальному дослідженні було встановлено, що для отримання найбільших врожаїв салату оптимальним є використання поживного розчину з електропровідністю (ЕС) в межах 1-1,5 dS·m⁻¹. Це свідчить про те, що при таких значеннях ЕС рослини отримують необхідну кількість поживних речовин, що сприяє їх активному росту і розвитку. Зменшення росту рослин спостерігалось при високих рівнях ЕС, що може бути зумовлено осмотичним стресом та обмеженням поглинання води і поживних речовин.

Важливою частиною дослідження стало порівняння двох гідропонних систем — NFT (нероздільна плівка) та CFT (аеропоніка). Загалом, система NFT показала дещо кращі результати за суху вагу рослин порівняно з CFT, але саме сорти, вирощені за допомогою CFT, виявилися найбільш ефективними, зокрема сорти «Red Sails» і «Salvius», які мали значно вищу продуктивність у цих системах. Це може бути пов'язано з більшим доступом до поживного розчину та кращими умовами для кореневої системи в системі CFT.

Щодо температурних умов, було встановлено, що оптимальна температура для вирощування салату становить 21,1°C. За цієї температури більшість сортів показали найкращі результати щодо свіжої та сухої маси. Однак результати також підтвердили, що багато сортів салату є чутливими до холоду, зниження температури призводить до сповільнення росту та зниження врожаїв. Особливо чутливими до холоду виявилися сорти, які за інших умов демонструють хорошу продуктивність, наприклад, «Buttercrunch» та «Salanova Red Oakleaf».

Цікавою знахідкою стало те, що деякі сорти продемонстрували значну холодостійкість. «New Red Fire» та «Dragoon» виявилися найбільш стійкими до холоду серед перевірених сортів. Це свідчить про їх здатність

адаптуватися до більш низьких температур, що робить їх перспективними для вирощування в умовах, де температура може коливатися нижче оптимальних значень.

Загалом, результати нашого дослідження вказують на те, що для досягнення високих врожаїв салату важливо враховувати не тільки рівень електропровідності розчину, але й тип гідропонної системи та температурні умови. Сорти, які демонструють високу продуктивність в оптимальних температурних умовах та мають високу стійкість до холоду, є найкращими кандидатами для вирощування в різних кліматичних зонах.

Список використаних джерел

1. Гіль Л.С., Пашковський А.І., Суліма Л.Т. Сучасні технології овочівництва закритого і відкритого ґрунту. Навч. посібник. Вінниця: Нова Книга, 2008. 368 с.
2. Пастушенко В.Й., Стеценко А.М. Автоматизована система керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур при крапельному зволоженні. *Автоматизированные системы управления и приборы автоматики*. Харків: Нац. ун-т радіоелектроніки, 2009. №147. С.46–52.
3. Севостьянов І.В., Мельник О.С. Удосконалення роботи гідропонних установок. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2021. №4(115). С.119–127.
4. Sevostianov I., Melnyk O. Elaboration and researches of apparatus of control for hydroponic installations. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2022. №1(104). С.57–62.
5. Ковальов М.М., Васильковська К.В. Вплив сольового складу поживного розчину на вирощування різних сортів салату ромен в гідропонних колонах. *Сучасний стан науки в сільському господарстві та природокористуванні: теорія і практика*. Кропивницький. ЦНТУ, 20.11.2020. С.83–86.
6. Міненко С.В., Савченко В.М., Крот В.В. Аналіз залежності інтенсивності продуктивного фотосинтезу від режимів мікроклімату в індустріальних теплицях. *Вісник Житомирського НАЕУ*. 2016. №1 (53). Т.1. С.270–275.
7. Савченко В.М., Міненко С.В., Махов О.А. Формальні моделі для регулювання мікроклімату в теплицях. *Матеріали міжнар. Наук.-практ. Інтернет-конференції*, 16 березня 2013. Тернопіль: Крок, 2013. С.87-89.
8. Савченко В.М., Міненко С.В., Махов О.А. Стратегії контролю процесами мікроклімату в індустріальних теплицях.



Підвищення надійності машин і обладнання: збірник тез доповідей 7 Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів та аспірантів. Кіровоград: КНТУ, 2013. С.48-50.

9. Ковальов М.М., Звездун О.М. Вирощування найпоширеніших сортів салату ромен на різних типах субстратів в NTF системах. *Водні біоресурси та аквакультура*. 2021. Вип.№1. С.27–36.

References

1. Gil L.S., Pashkovskiy A.I., Sulima L.T. (2008) Modern technologies of vegetable growing in closed and open soil. Education manual. Vinnytsia: Nova Kniga, 368 p. [in Ukrainian].

2. Pastushenko V.Y., Stetsenko A.M. (2009) Automated system for managing the moisture supply of agricultural crops during drip irrigation. *Automated control systems and automation devices*. Kharkiv: National University of Radio Electronics. № 147. P.46–52. [in Ukrainian].

3. Sevostyanov I.V., Melnyk O.S. (2021) Improving the operation of hydroponic installations. *Technology, energy, transport of agricultural industry*. № 4(115). P.119–127. [in Ukrainian].

4. Sevostianov I., Melnyk O. (2022) Elaboration and researches of apparatus of control for hydroponic installations. *Vibrations in engineering and technology*. № 1(104). P.57–62. [in English]

5. Kovalev M.M., Vasytkovska K.V. (2020) The influence of the salt composition of the nutrient solution on the cultivation of different varieties of romaine lettuce in hydroponic columns. *Current state of science in agriculture and nature management: theory and practice*. Kropyvnytskyi. National Technical University, November 20, 2020. P.83–86. [in Ukrainian].

6. Minenko S.V., Savchenko V.M., Krot V.V. (2016) Analysis of the dependence of the intensity of productive photosynthesis on microclimate regimes in industrial greenhouses. *Bulletin of Zhytomyr NAEU*. № 1 (53). T.1. P.270–275. [in Ukrainian].

7. Savchenko V.M., Minenko S.V., Makhov O.A. (2013) Formal models for microclimate regulation in greenhouses. Materials of international Scientific and practical Internet conferences, March 16, 2013. Ternopil: Krok. P.87-89. [in Ukrainian].

8. Savchenko V.M., Minenko S.V., Makhov O.A. (2013) Strategies for controlling microclimate processes in industrial greenhouses. *Increasing the reliability of machines and equipment: a collection of theses of reports of the 7th All-Ukrainian scientific and practical conference of students and postgraduates*. Kirovohrad: KNTU,

P.48-50. [in Ukrainian].

9. Kovalev M.M., Zvezdun O.M. (2021) Cultivation of the most common varieties of romaine lettuce on different types of substrates in NTF systems. *Aquatic bioresources and aquaculture*. Issue 1. P.27–36. [in Ukrainian].

EXPERIMENTAL STUDY OF WATER AND NUTRIENT BALANCE INTERACTIONS IN CLOSED HYDROPONIC SYSTEMS

This article presents a study aimed at modeling the interactions of water and nutrient balances in hydroponic systems, which are increasingly recognized as an environmentally sustainable and highly efficient method for growing plants without soil. Hydroponic systems provide optimal nutrient delivery to plants through a water solution maintained in a closed cycle, reducing water and fertilizer usage compared to traditional agriculture. However, the effectiveness of such systems largely depends on precise regulation of water and nutrient balances to ensure proper plant growth and optimize resource use.

The purpose of this study is to develop a comprehensive model that considers the dynamics of water and nutrient environments within the hydroponic system and predicts plants' requirements for essential nutrients. The article examines key parameters that influence nutrient balance in hydroponics, including pH level, concentrations of essential micro- and macronutrients, nutrient uptake rates by plants, evaporation, transpiration, temperature variations, and the nutrient ratio in the solution. Achieving stable water and nutrient balance requires accounting for all these factors and adjusting system parameters according to external conditions and the plants' growth stage.

The study's methodology is based on a combination of mathematical modeling and experimental data, enabling the creation of an adaptive model for the hydroponic system. The article details the model structure, including input variables (temperature, humidity, nutrient concentration), exchange processes (uptake and transpiration), and output variables (optimal nutrient element concentrations). The modeling results facilitate the control and adjustment of the nutrient solution, minimizing water and fertilizer usage while ensuring maximum plant yield.

The practical significance of the developed model lies in its applicability for managing hydroponic farms of various scales, from home setups to industrial agricultural enterprises.

Keywords: hydroponic method, nutrient solution, root system, substrate, energy efficiency, productivity.

**Відомості про авторів**

Стаднік Микола Іванович – доктор технічних наук, професор кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна).

Бурлака Сергій Андрійович – доктор філософії з галузевого машинобудування, старший викладач кафедри інженерної механіки та технологічних процесів в АПК Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, e-mail: ipserhiy@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4079-4867>)

Луц Павло Михайлович – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри машин та обладнання сільськогосподарського виробництва Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, e-mail: serhiydron@gmail.com)

Stadnik Mykola – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Electrical Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics of Vinnytsia National Agrarian University (3 Sonyachna St., Vinnytsia, 21008, Ukraine).

Burlaka Serhiy – Doctor of Philosophy in Industrial Mechanical Engineering, Senior Lecturer of the Department of Engineering Mechanics and Technological Processes in the Agricultural Industry of Vinnytsia National Agrarian University (3 Sonyachna St., Vinnytsia, 21008, Ukraine, e-mail: ipserhiy@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4079-4867>)

Luts Pavlo – Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of the Department of Machinery and Equipment for Agricultural Production of Vinnytsia National Agrarian University (3 Sonyachna St., Vinnytsia, 21008, Ukraine, e-mail: serhiydron@gmail.com)