

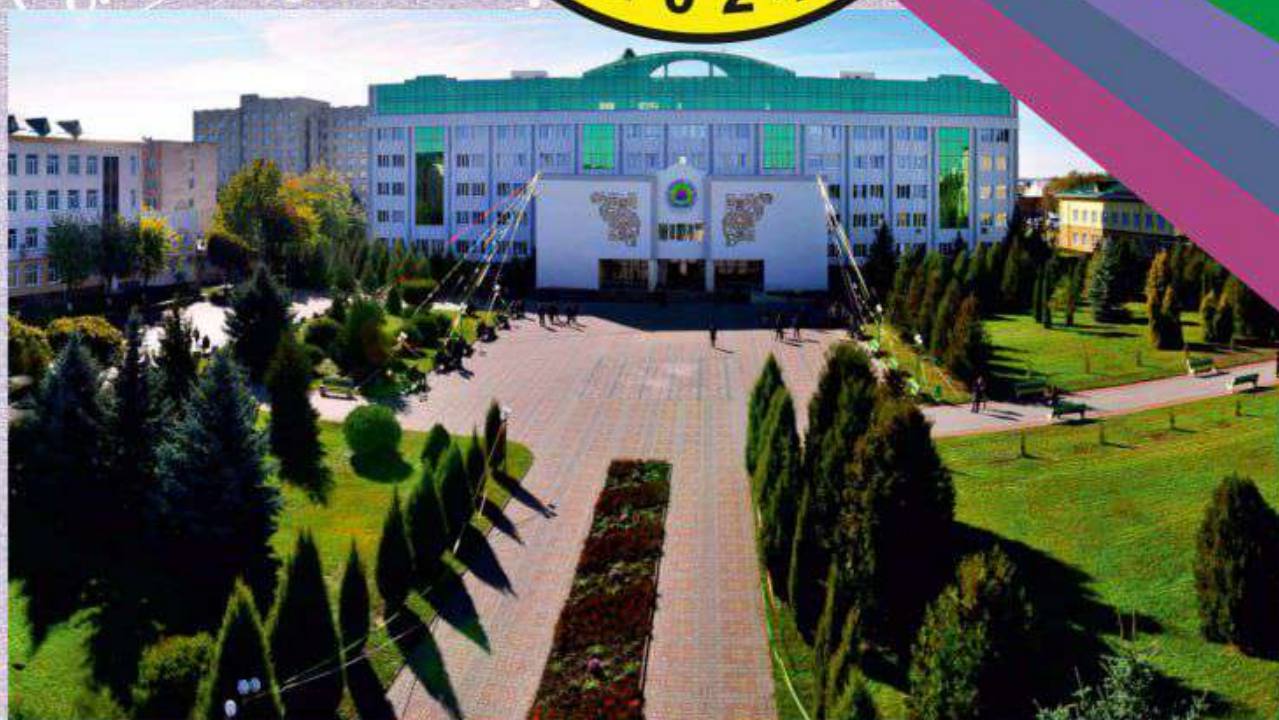
Всеукраїнський науково-технічний журнал

Ukrainian Scientific & Technical Journal

ISSN 2306-8744

DOI: 10.37128/2306-8744-2024-4

Вібрації в техніці та технологіях



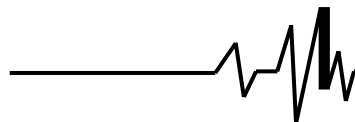
Всеукраїнський науково-технічний журнал

Ukrainian Scientific & Technical Journal

Вібрації в техніці та технологіях

№ 4 (115)

Вінниця 2024

**ВІБРАЦІЇ В
ТЕХНІЦІ ТА
ТЕХНОЛОГІЯХ**

Журнал науково-виробничого та навчального
спрямування Видавець: Вінницький національний
аграрний університет

Заснований у 1994 році під назвою “Вібрації в техніці та
технологіях”

Свідоцтво про державну реєстрацію засобів масової
інформації

КВ № 16643-5115 ПР від 30.04.2010 р.

Всеукраїнський науково-технічний журнал “Вібрації в техніці та технологіях” / Редколегія: Калетнік Г.М. (головний редактор) та інші. – Вінниця, 2024. – 4 (115) – 87 с.

Друкується за рішенням Вченої ради Вінницького національного аграрного університету (протокол № 6 від 24.12.2024 р.)

Періодичне видання включено до Переліку наукових фахових видань України з технічних наук (Категорія «Б» Наказ Міністерства освіти і науки України від 02.07.2020 р. № 886)

Згідно рішення Національної ради України з питань телебачення та радіомовлення від 25.04.2024 р. № 1337 науковому журналу «Вібрації в техніці та технологіях» присвоєно ідентифікатор медіа R30-05172.

*- присвоєно ідентифікатор цифрового об'єкта (Digital Object Identifier – DOI);
- індексується в CrossRef, Google Scholar;
- індексується в міжнародній наукометричній базі Index Copernicus Value з 2018 року.*

Головний редактор

Калетнік Г.М. – д.е.н., професор,
академік НААН України, Вінницький
національний аграрний університет

**Заступник головного
редактора**

Адамчук В.В. – д.т.н., професор, академік
НААН України, Інститут механіки та
автоматики агропромислового виробництва
НААН України

Відповідальний секретар

Солона О.В. – к.т.н., доцент, Вінницький
національний аграрний університет

Члени редакційної колегії

Булгаков В.М. – д.т.н., професор, академік
НААН України, Національний університет
біоресурсів і природокористування України

Деревенько І. А. – к.т.н., доцент,
Національний університет
«Львівська політехніка»

Купчук І.М. – к.т.н., доцент, Вінницький
національний аграрний університет

Матвеев В.В. – д.ф.-м.н., професор,
академік НАН, Інститут проблем міцності
імені Г.С. Писаренка НАН України

Полєвода Ю.А. – к.т.н., доцент, Вінницький
національний аграрний університет

Твердохліб І.В. – к.т.н., доцент, Вінницький
національний аграрний університет

Токарчук О.А. – к.т.н., доцент, Вінницький
національний аграрний університет

Цуркан О.В. – д.т.н. професор, Вінницький
національний аграрний університет

Яропуд В.М. – к.т.н., доцент, Вінницький
національний аграрний університет

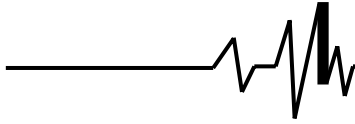
Зарубіжні члени редакційної колегії

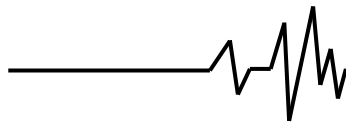
Максімов Джордан Тодоров – д.т.н., проф., Технічний Університет Габрово (Болгарія)

Технічний редактор **Замрій М.А.**

Адреса редакції: 21008, Вінниця, вул. Сонячна 3, Вінницький національний аграрний
університет, тел. 46 – 00– 03

Сайт журналу: <http://vibrojournal.vsau.org/> Електронна адреса: vibration.vin@ukr.net

**З М І С Т****I. ТЕОРІЯ ПРОЦЕСІВ ТА МАШИН***Цуркан О.В., Спірін А.В., Гудзенко Н.М., Дідик А.М.***МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ВОЛОСЬКИХ ГОРІХІВ В КОНВЕКТИВНО-ВІБРАЦІЙНІЙ СУШАРЦІ.....5***Стаднік М.І., Бурлака С.А., Луц П.М.***ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМОДІЇ ВОДНОГО ТА ПОЖИВНОГО БАЛАНСУ В ЗАМКНУТИХ ГІДРОПОНІЧНИХ СИСТЕМАХ.....15***Барановський В.М., Борецька Т.Ю., Козут В.М.***ІНТЕРАКТИВНИЙ ВПЛИВ СПЕКТРАЛЬНОГО СКЛАДУ ДОДАТКОВОГО ОСВІТЛЕННЯ ТА ТЕМПЕРАТУРИ КОРЕНЕВОЇ ЗОНИ НА ПРОДУКТИВНІСТЬ ГІДРОПОННОГО САЛАТУ.....24***Kondratuk D., Trukhanska O., Priadkin M.***RESEARCH OF PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF CUT GRASS DURING HAY HARVESTING BY ROTARY WORKING BODIES.....31****II. МАШИНОБУДУВАННЯ ТА МАТЕРІАЛООБРОБКА***Вакуленко Р.А.***РОЗРОБКА МОДЕЛІ ПОВЕДІНКИ НЕЖОРСТКИХ СКЛАДНОЇ КОНФІГУРАЦІЇ МІЖТРУБНИХ ПЕРЕМИЧОК ТРУБНОЇ ДОШКИ ПРИ ІМПУЛЬСНОМУ НАВАНТАЖЕННІ.....36***Штуць А.А., Бабін І.А., Луц П.М., Руткевич В.С.***МОДЕЛЮВАННЯ ТА ВИМІРЮВАННЯ ВИСАДЖУВАННЯ ЗОВНІШНІХ БУРТІВ НА ТРУБНИХ ЗАГОТОВКАХ ПРОЦЕСУ ШТАМПУВАННЯ ОБКОЧУВАННЯМ МЕТОДОМ СКІНЧЕНИХ ЕЛЕМЕНТІВ.....44****III. ПЕРЕРОБНІ ТА ХАРЧОВІ ВИРОБНИЦТВА***Цуркан О.В., Спірін А.В., Дідик А.М., Бондаренко М.П.***ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ІНТЕНСИВНОСТІ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ВОЛОСЬКИХ ГОРІХІВ.....52***Зозуляк І.А., Кондратюк Д.Г., Коробко Д.О.***ОБґРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ПРИНЦИПОВОЇ СХЕМИ СУБЛІМАЦІЙНОГО СВЧ-СУШІННЯ ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ.....60***Novhorodska N.***INFLUENCE OF ULTRASOUND VIBRATIONS ON THE FERMENTATION PROCESS OF FERMENTED MILK DRINKS.....70***Бровко Р.С., Пугач А.М., Калина В.С.***ДОСЛІДЖЕННЯ ВІДЖИМУ ОЛІЄВМІСНОЇ СИРОВИНИ НА ШНЕКОВОМУ ПРЕСІ.....77****IV. ДУМКА МОЛОДОГО ВЧЕНОГО***Lysenko R.***SIMULATION OF TRACTOR ENGINE OPERATION IN GAS-DIESEL MODE.....84**

**Барановський В.М.**

д.т.н., професор

*Тернопільський
національний технічний
університет імені Івана
Пулюя***Борецька Т.Ю.**

асистентка

Когут В.М.

асистент

*Вінницький національний
аграрний університет***Baranovskyi V.**Doctor of Technical Sciences,
Professor*Ternopil Ivan Puluj National
Technical University***Boretska T.**

assistant

Kohut V.

assistant

*Vinnitsia National Agrarian
University***УДК 631.3:519.876.5****DOI: 10.37128/2306-8744-2024-4-3**

ІНТЕРАКТИВНИЙ ВПЛИВ СПЕКТРАЛЬНОГО СКЛАДУ ДОДАТКОВОГО ОСВІТЛЕННЯ ТА ТЕМПЕРАТУРИ КОРЕНЕВОЇ ЗОНИ НА ПРОДУКТИВНІСТЬ ГІДРОПОННОГО САЛАТУ

Гідропонне виробництво салату в теплицях набуває популярності в Україні, проте досліджень, які б оцінювали вплив спектрів світла, температури кореневої зони, різних виробничих систем і сортів салату на врожайність, недостатньо. Це дослідження спрямоване на визначення інтерактивного впливу нічного додаткового освітлення, температури живильного розчину та виробничої системи на ріст і продуктивність різних сортів салату за умов субоптимальної температури повітря, характерної для зимових теплиць.

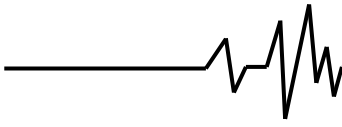
У дослідженні використовували три режими додаткового освітлення: відсутність освітлення (контроль), фіолетові світлодіоди (спектр R90:G0:B10) та теплі білі світлодіоди (спектр R35:G42:B23). Дві температури живильного розчину — 12,6 °C (без підігріву) і 18,8 °C (з підігрівом), а також дві виробничі системи — метод поживної плівки (NFT) і стіл постійного затоплення (CFT) — застосовувалися для вирощування салату. Досліджували червоні та зелені сорти чотирьох типів: листові, качанові, дуболистні та роменові.

Результати показали, що відсутність додаткового освітлення та підігріву значно знижує врожайність, тоді як їх комбінація позитивно впливала на суху масу пагонів. Найвищу продуктивність забезпечила система CFT, особливо у поєднанні з фіолетовими світлодіодами, які мали більшу частку червоного світла, що стимулює ріст рослин. Виявлено, що фіолетове освітлення значно перевершує білі світлодіоди, особливо за умов підігріву живильного розчину.

Найчутливішими до умов кореневої зони та освітлення виявилися сорти салату Адріана, Кедр, Червоні вітрила та Сальвій. Зокрема, під фіолетовими світлодіодами вони демонстрували найвищу продуктивність за умов використання системи CFT.

Дослідження пропонує ефективні стратегії оптимізації гідропонного вирощування салату в зимових умовах теплиць в Україні. Його результати можуть бути корисними для фермерів, які прагнуть підвищити врожайність та якість продукції, а також для оптимізації витрат за умов обмежених ресурсів.

Ключові слова: маса рослин, площа листя, коренева система, гідропонний метод, овочеві культури, установка, субстрат, мінеральний розчин, гідропоніка.



Вступ. Вирощування сільськогосподарських культур у відкритому ґрунті взимку на заході України ускладнюється через низькі температури, короткий світловий день та недостатній рівень природного освітлення. У цих умовах все більш актуальним стає використання систем сільського господарства з контрольованим середовищем (СКУ), які дозволяють підтримувати оптимальні умови для вирощування рослин протягом усього року. Одним із найефективніших методів у рамках СКУ є гідропоніка — система вирощування рослин у спеціальному поживному розчині без використання ґрунту.

Серед найпоширеніших технологій гідропонного вирощування виділяють метод поживної плівки (NFT), глибоководну культуру (DWC) та стіл постійного затоплення (CFT). Ці методи дозволяють значно підвищити ефективність використання ресурсів і продуктивність, що робить їх ідеальними для зимового вирощування. У таких системах особливе місце посідають листяні культури, серед яких салат залишається найбільш популярною культурою завдяки своїм високим споживчим якостям і здатності адаптуватися до різних умов вирощування.

Однак зимове виробництво салату на гідропоніці потребує значних енергетичних ресурсів. Додаткове освітлення та обігрів у теплицях взимку значно збільшують операційні витрати. Вирощування салату в гідропонних системах потребує більше енергії, ніж традиційне вирощування в полі, що зумовлено необхідністю створення оптимальних умов для зростання, таких як підвищення інтенсивності освітлення та підтримання стабільного температурного режиму.

Відомо, що інтенсивність і спектральний склад світла мають вирішальний вплив на ріст і якість салату. Оптимальний рівень освітлення забезпечує активне зростання біомаси, тоді як недостатнє освітлення сповільнює ріст і знижує якість продукції через накопичення нітратів і дефіцит поживних речовин. Крім того, поєднання різних спектрів світла, таких як синій, червоний і далекочервоний, сприяє поліпшенню фітохімічного складу салату.

Незважаючи на численні дослідження, які стосуються денного освітлення, вплив нічного освітлення на гідропонне виробництво салату досі залишається недостатньо вивченим. Також обмежені дані щодо впливу різних спектральних складів світла, які використовуються вночі, на врожайність та якість салату. Важливим є і питання взаємодії між спектральним складом світла, температурним режимом, системою виробництва та сортовими особливостями салату.

Оптимізація цих факторів є критично важливою для покращення врожайності, якості та

економічної доцільності виробництва салату взимку. Комплексний підхід до вивчення впливу додаткового освітлення, температури поживного розчину, системи вирощування та сортових особливостей може забезпечити ефективне використання ресурсів і підвищити конкурентоспроможність виробників.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Останні дослідження в галузі вирощування салату в контрольованих середовищах демонструють значний прогрес у розумінні впливу факторів освітлення, температури та виробничих систем на ріст і врожайність цієї культури. Встановлено, що додаткове освітлення в зимовий період є ключовим для досягнення високої продуктивності. Зокрема, збільшення інтенсивності світла в денний час значно підвищує біомасу салату, покращує його якість і знижує вміст нітратів у листі. Проте дослідження спектрального складу нічного освітлення залишаються обмеженими.

Дослідження ефективності різних спектрів світла підтвердили, що синій і червоний спектри найбільш позитивно впливають на фотосинтез і ріст салату. Наприклад, поєднання червоного та синього світла у співвідношенні 4:1 сприяє максимальному накопиченню біомаси. У той же час, додавання далекочервоного спектру до цього співвідношення може покращувати вміст вторинних метаболітів. Однак вплив різних спектральних комбінацій вночі залишається недостатньо вивченим, що створює прогалину у знаннях щодо їхньої ефективності порівняно з денним освітленням.

Щодо температури, більшість досліджень підтверджують, що оптимізація температури кореневої зони є критично важливою для підтримання ефективного росту рослин. Зокрема, підігрів поживного розчину до 18–20 °C взимку сприяє кращому засвоєнню поживних речовин і підвищенню врожайності. У порівнянні з традиційними методами підтримання температури повітря, підігрів поживного розчину є більш енергоефективним способом регулювання теплового режиму.

У контексті гідропонних систем, найбільш поширені методи, такі як технологія поживної плівки (NFT), глибоководна культура (DWC) та стіл постійного затоплення (CFT), демонструють різний вплив на врожайність салату. Наприклад, система CFT показала кращі результати щодо продуктивності в умовах додаткового освітлення порівняно з NFT. Це може бути пов'язано з постійним забезпеченням кореневої системи поживним розчином і більш стабільними температурними умовами в системі CFT.

Деякі сорти салату демонструють більшу адаптивність до певних виробничих умов, ніж інші. Наприклад, листові сорти, такі як "Червоні вітрила", краще адаптуються до умов низького



освітлення, тоді як роменові сорти, такі як "Сальвіус", краще реагують на оптимізовані умови температури та додаткового освітлення. Відповідно, вибір сорту відіграє важливу роль у забезпеченні стабільної врожайності.

Таким чином, сучасні дослідження вказують на необхідність комплексного підходу до оптимізації факторів вирощування, включаючи спектр і інтенсивність освітлення, температурний режим і тип виробничої системи. Проте обмежена кількість даних щодо інтерактивного впливу цих факторів, особливо в умовах нічного освітлення, створює потребу у подальших дослідженнях. Це дозволить більш ефективно адаптувати технології гідропонного виробництва до умов зимових теплиць та підвищити економічну ефективність вирощування салату.

Метою досліджень. Метою даного дослідження є визначення інтерактивного впливу нічного додаткового освітлення, температури поживного розчину та виробничої системи на ріст і продуктивність різних сортів салату в умовах теплиць із субоптимальною температурою повітря. Дослідження спрямоване на оптимізацію ключових факторів вирощування для забезпечення високої врожайності та якості салату в зимовий період, що є актуальним для регіонів із холодним кліматом

Матеріали та методи. У дослідженні використовували вісім сортів салату (*Lactuca sativa* L.), які належать до різних морфологічних груп: листовий (сорти Red Sails та Black Seeded Simpson), качановий (сорти Alkindus та Adriana), дуболистий (сорти Navara та Cedar) і роменівий (сорти Breen та Salvius). Сорти було відібрано на основі їхньої врожайності, визначеної у попередніх експериментах, щоб забезпечити репрезентативність дослідження (дані не представлені).

Експерименти проводилися в умовах теплиці з клімат-контролем в Університеті Пердью, розташованому у Вест-Лафайєті, штат Індіана, у зимовий період — з січня по лютий 2019 року. Теплиця площею 111,5 м² була оснащена системами регуляції температури та освітлення для забезпечення стабільних умов вирощування. Температуру повітря підтримували на рівні 15 °C вдень ($\pm 0,19$ °C) і 10 °C вночі ($\pm 0,15$ °C), що відображало субоптимальні умови для вирощування салату.

Середній рівень щоденної світлової інсоляції (DLI) від сонячного світла складав 4,2 моль м⁻² день⁻¹ ($\pm 0,49$ моль м⁻² день⁻¹), що відповідає типовим умовам для регіону у зимовий період. Насіння салату висівали у спеціальні контейнери, а через 10 днів після пророщування рослини пересажували до експериментальних систем, де вони росли протягом наступних 40 днів.

Таке тривале вирощування дозволило оцінити не лише ранній ріст рослин, але й динаміку їхнього розвитку до товарної зрілості в умовах, що моделюють реальну тепличну практику зимового сезону.



Рис. 1. Експериментальний дизайн в рамках однієї світлової обробки в реплікації, де гідропонні системи з підігрівом і без підігріву, системи виробництва CFT і NFT, а також різні сорти культур були рандомізовані.

Для забезпечення оптимальних умов вирощування використовували спеціально підготовлений живильний розчин, до складу якого входили комплексне добриво 5-11-26 (Peters Professional, ICL Specialty Fertilizers, Ізраїль) та кальцієва селітра 15,5-0-0 (YaraLiva, Yara North America, США). Для створення розчину застосовували інжектор добрив (D14M22, Dosatron International, США), який забезпечував точне змішування маточного розчину з водою до необхідної концентрації.

Для зрошення використовували підкислену водопровідну воду з електропровідністю (EC) 0,7 дСм⁻¹. Впродовж перших двох тижнів EC живильного розчину підтримували на рівні $1,0 \pm 0,24$ дСм⁻¹, а після заміни розчину цей показник підвищили до $1,7 \pm 0,2$ дСм⁻¹. Для регуляції pH розчину (в межах 5,5–6,5) застосовували 85% сірчану кислоту, оскільки початковий рівень pH води перевищував 7,5.

Моніторинг параметрів живильного розчину здійснювали за допомогою датчиків pH та EC, а також сучасних реєстраторів даних, які фіксували показники у режимі реального часу. Для уникнення накопичення небажаних солей та забезпечення стабільного складу розчину його замінювали свіжим на другому та четвертому тижнях експерименту. Уся система працювала на принципі рециркуляції розчину, що забезпечувало постійний доступ до поживних речовин для рослин.

Виробничі системи

Гідропонні виробничі системи розташовувалися на спеціальних стендах у теплиці. Для дослідження використовували два типи систем: метод поживної плівки (NFT) і стіл постійного затоплення (CFT).



Системи склалися з резервуарів для живильного розчину об'ємом 76 літрів, насосів, каналів NFT (1,52 м довжиною, 0,12 м шириною) та лотків CFT (1,22 м довжиною, 0,31 м шириною). В системі NFT канали були підняті на 15 см для створення ухилу, що забезпечувало стікання розчину за градієнтом. У системі CFT рівень води у лотках контролювався спеціальними подовжувачами, що дозволяло воді підніматися до 3,8 см перед зливом.

Кожна одиниця виробничої системи вмщувала 16 рослин, які розміщувалися з відстанню 0,18 м × 0,13 м у NFT та 0,17 м × 0,13 м у CFT. Для висаджування використовували куби з мінеральної вати або сітчасті горщики, які забезпечували належну фіксацію рослин. Додаткове освітлення та підігрів живильного розчину

Для дослідження застосовували два типи світлодіодних ламп з різним спектральним складом. Світильники були згруповані у блоки, які розташовувалися на висоті 0,61–0,91 м над рослинами, забезпечуючи рівномірну інтенсивність освітлення ($145 \text{ мкмоль м}^{-2} \text{ с}^{-1}$).

Додаткове освітлення працювало 14 годин на добу (з 16:00 до 6:00), що дозволяло компенсувати недостатню природну освітленість. Температура живильного розчину регулювалася за допомогою акваріумних нагрівачів потужністю 200 Вт, які забезпечували постійний підігрів. Нагрівачі розміщувалися на дні резервуарів і працювали безперервно, що мінімізувало коливання температури розчину протягом експерименту.

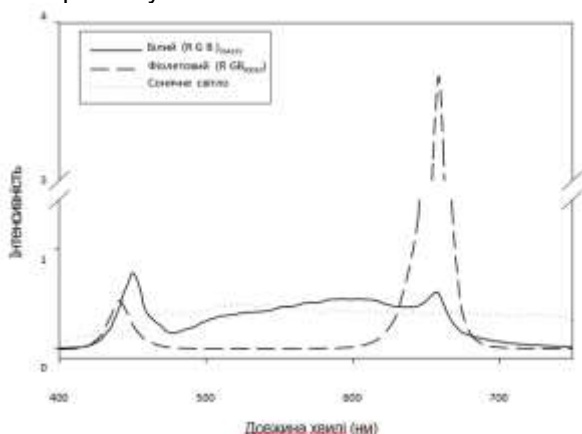


Рис. 2. Спектральні сигнатурні криві для двох світлодіодних додаткових ліхтарів, використаних у дослідженні

Експеримент був організований за складною розщепленою-розщепленою-розщепленою схемою з чотирма повтореннями. Ділянки були розташовані перпендикулярно до градієнта температури в теплиці, щоб мінімізувати вплив мікрокліматичних змін. Основним фактором обробки виступав тип освітлення, що включав три режими: без додаткового світла (НДЛ), фіолетове

додаткове світло (PSL) і біле додаткове світло (WSL).

У режимі НДЛ рослини отримували лише $4,2 \text{ моль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{д}^{-1}$ сонячного світла.

У режимах PSL (спектральний склад: R90:G0:B10) і WSL (R35:G42:B23) додатково забезпечували $7,3 \text{ моль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{д}^{-1}$ світла в нічний час, доводячи фотоперіод до 24 годин.

Для моніторингу освітленості та температури під час експерименту використовували світлові датчики (SQ-110 SS) та температурні датчики (ST 110), підключені до реєстраторів даних, що забезпечувало постійний збір інформації.

Кожна ділянка мала площу $1,5 \times 2,5 \text{ м}$ та включала дві температурні обробки живильного розчину: з підігрівом (середня температура $18,8 \pm 0,42 \text{ }^\circ\text{C}$) та без підігріву ($12,6 \pm 0,37 \text{ }^\circ\text{C}$). Живильний розчин подавався через резервуари до двох виробничих систем: NFT (чотири канали) та CFT (два лотки).

На кожній виробничій системі вирощували вісім сортів салату (по чотири рослини на сорт). Таким чином, для експерименту було використано дві одиниці кожної системи NFT та CFT, загалом виростили 1536 рослин:

4 повторення × 3 режими освітлення × 2 температурні режими × 2 системи вирощування × 8 сортів × 4 рослини на сорт.

Розподіл ділянок у межах експерименту був випадковим, що забезпечувало репрезентативність отриманих результатів.

Після завершення експерименту пагони рослин із кожної групи з чотирьох рослин (одного сорту) збирали для визначення свіжої маси. Потім зразки висушували у сушильній шафі при температурі $80 \text{ }^\circ\text{C}$ для визначення сухої маси.

Споживання електроенергії кожним компонентом системи (світлодіодні лампи, насоси, нагрівачі) вимірювалося окремо за допомогою електричних лічильників. Енергетичні витрати для додаткового освітлення розраховувалися на основі спожитої потужності та тривалості роботи ламп.

Нагрітий живильний розчин подавався до двох лотків системи CFT і чотирьох каналів системи NFT з одного резервуара. Через більший об'єм води, що протікає через систему CFT, її енергоспоживання виявилось вищим порівняно з системою NFT.

Для окремого визначення витрат на опалення для кожної системи канали NFT і лотки CFT були підключені до окремих резервуарів. Енергоспоживання вимірювалося протягом 24 годин для кожного резервуара. Цю процедуру повторювали тричі, щоб отримати усереднені показники енергоспоживання для кожної системи.

Результати показали, що:

Середнє споживання електроенергії системою NFT (чотири канали) становило $2,35 \text{ кВт} \cdot \text{год}$ на добу.



Середнє споживання електроенергії системою CFT (два лотки) становило 3,17 кВт·год на добу.

Це відповідає розподілу енергоспоживання:

42,5% від загального обсягу енергії споживала система NFT.

57,5% — система CFT.

Ці дані демонструють, що система CFT має вищі енергетичні витрати через більший обсяг циркуляції води. Така інформація є критичною для оптимізації енергоефективності гідропонних виробничих систем, особливо в умовах обмежених ресурсів.

Результати експерименту виявили значущу тристоронню взаємодію між додатковим освітленням, температурою розчину та типом виробничої системи на накопичення сухої маси пагонів (SDW) у салату. У системі CFT було зафіксовано вищу масу пагонів у порівнянні з системою NFT за умов як підігрітого, так і не підігрітого живильного розчину, але лише за наявності додаткового освітлення. У разі відсутності додаткового освітлення, значущих відмінностей у масі пагонів між двома системами вирощування не спостерігалось.

Однією з ключових відмінностей між CFT і NFT є обсяг доступної води та поживних речовин, особливо на ранніх стадіях росту. У системі CFT кубики мінеральної вати повністю занурені у живильний розчин, насичений киснем і поживними речовинами. У випадку NFT коріння отримує воду через капілярну дію, оскільки кубики розташовані на тонкій плівці живильного розчину. Такий обмежений контакт може спричинити накопичення солей у верхній частині кубиків через капілярну дію, що створює ризик сольового стресу, особливо на стадії розсади, коли ріст коренів обмежений.

У системі NFT коріння рослин починає активно поглинати воду тільки після того, як воно досягає дна каналу. За спостереженнями, цей процес може тривати близько тижня після пересадки. Таке відставання в поглинанні води та поживних речовин може бути однією з причин повільнішого росту рослин у системі NFT.

Ще одним важливим фактором, що впливає на продуктивність, є температура повітря всередині каналів NFT. Вимірювання після експерименту показали, що температура в каналах NFT наближається до температури навколишнього середовища в теплиці, навіть у разі підігріву живильного розчину. В умовах холодного повітря коренева система рослин у NFT може зазнавати неоптимального температурного впливу, що негативно позначається на рості.

У системі CFT цей фактор менш суттєвий через повне занурення коренів у живильний розчин, температура якого більш стабільна.

Вплив додаткового освітлення значно підсилює різницю між двома виробничими

системами. У відсутності додаткового світла рівень сонячного DLI становив лише третину від оптимального для салату (12-15 моль·м⁻²·д⁻¹). У таких умовах переваги CFT над NFT не проявлялися через недостатність енергії для активного росту. Однак за умов додаткового освітлення ці переваги стали помітними завдяки кращому забезпеченню кореневої системи водою та поживними речовинами у системі CFT.

Таким чином, взаємодія додаткового освітлення, температури розчину та типу виробничої системи має вирішальне значення для оптимізації росту салату та підвищення ефективності гідропонних систем.

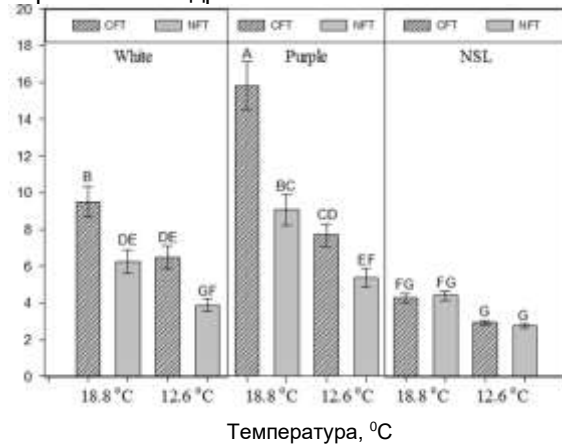


Рис. 3. Трестороння взаємодія між додатковим освітленням (білим, фіолетовим та без додаткового освітлення), температурою живильного розчину (18,8о С; 12,6о С) та виробничою системою (CFT; NFT) на середню суху масу пагонів (г/м-2) (P<0,001).

Результати експерименту показали, що рослини салату, вирощені під фіолетовим світлодіодним освітленням (R90:G0:B10) та забезпечені підігрітим живильним розчином у системі CFT, мали найвищу суху масу пагонів (ТПВ) серед усіх умов дослідження. Крім того, у системах CFT і NFT рослини були більшими під фіолетовими світлодіодами, ніж під білими (R35:G42:B23), за умови підігрітого живильного розчину. Це свідчить про перевагу фіолетового спектра, багатого на червоне світло, над білим спектром, де частка червоного значно менша, для стимуляції росту салату.

Висновки та напрямки подальших досліджень. Рослини салату, вирощені під фіолетовими світлодіодами, забезпечували вищу суху масу пагонів (ТПВ) порівняно з білими світлодіодами. Це обумовлено більшою часткою червоного світла у фіолетовому спектрі, що стимулює вегетативний ріст.

Додавання додаткового освітлення мало вирішальний вплив на продуктивність систем вирощування незалежно від температури живильного розчину. За умов обмежених ресурсів



пріоритетом має бути інвестування в додаткове освітлення.

Система CFT продемонструвала більшу продуктивність у порівнянні з NFT, особливо за умов додаткового освітлення та підігрітого живильного розчину. Це пояснюється більшим об'ємом доступного поживного розчину та більш сприятливими умовами для розвитку коренів.

Підігрів живильного розчину значно підвищував продуктивність рослин у системах вирощування, але його вплив поступався впливу додаткового освітлення. Відсутність підігріву в умовах додаткового освітлення також забезпечувала прийнятний рівень росту.

За відсутності додаткового освітлення відмінності між системами CFT і NFT були мінімальними. Однак із додатковим освітленням перевага системи CFT стала більш виразною, що свідчить про її кращу адаптацію до інтенсивного вирощування.

У зимових умовах найефективнішим підходом для збільшення продуктивності є забезпечення оптимального DLI (добової кількості світла) за рахунок додаткового освітлення, яке значно переважає вплив підігріву поживного розчину.

У ранніх фазах росту, через обмежений обсяг поживного розчину та можливе накопичення солей, система NFT виявилася менш ефективною, особливо за умов неоптимальної освітленості та температури.

Зменшення частки червоного світла та збільшення частки зеленого і синього в білому світлі знижувало продуктивність рослин. Це вказує на необхідність ретельного вибору світлодіодних ламп для досягнення максимальної ефективності вирощування.

Список використаних джерел

1. 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.

2. Гіль Л.С., Пашковський А.І., Суліма Л.Т. Сучасні технології овочівництва закритого і відкритого ґрунту. Навч. посібник. Вінниця: Нова Книга, 2008. 368 с.

3. 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.

4. 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.

5. Міненко С.В., Савченко В.М., Крот В.В. Аналіз залежності інтенсивності продуктивного фотосинтезу від режимів мікроклімату в індустриальних теплицях. *Вісник Житомирського НАЕУ*. 2016. №1 (53). Т.1. С.270–275.

6. 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.

7. Савченко В.М., Міненко С.В., Махов О.А. Стратегії контролю процесами мікроклімату в індустриальних теплицях. Підвищення надійності машин і обладнання: *збірник тез доповідей 7 Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів та аспірантів*. Кіровоград: КНТУ, 2013. С.48-50.

8. 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.

9. Севостьянов І.В., Мельник О.С. Удосконалення роботи гідропонних установок. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2021. №4(115). С.119–127.

References

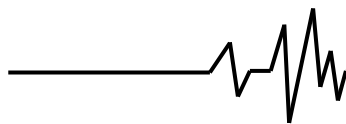
1. Sevostianov I., Melnyk O. (2022) Elaboration and researches of apparatus of control for hydroponic installations. *Vibrations in engineering and technology*. № 1(104). P.57–62. [in English].

2. 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].

3. Kovalev M.M., Vasylykovska 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].

4. 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].

5. 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). Т.1. P.270–275. [in Ukrainian].



6. 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].

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. 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].

INTERACTIVE IMPACT OF THE SPECTRAL COMPOSITION OF ADDITIONAL LIGHTING AND ROOT ZONE TEMPERATURE ON THE PRODUCTIVITY OF HYDROPONIC LETTUCE

Hydroponic lettuce production in greenhouses is becoming increasingly popular in Ukraine. However, there is a lack of research evaluating the impact of light spectra, root zone temperature, production systems, and lettuce varieties on yield. This study aims to determine the interactive effects of nighttime supplemental lighting, nutrient solution temperature, and production system on the growth and productivity

of various lettuce varieties under suboptimal air temperatures typical for winter greenhouses.

The study used three lighting regimes: no lighting (control), violet LEDs (spectrum R90:G0:B10), and warm white LEDs (spectrum R35:G42:B23). Two nutrient solution temperatures—12.6 °C (no heating) and 18.8 °C (with heating)—as well as two production systems—Nutrient Film Technique (NFT) and Constant Flood Table (CFT)—were applied for lettuce cultivation. Red and green lettuce varieties of four types were studied: leafy, heading, oakleaf, and romaine.

The results showed that the absence of supplemental lighting and heating significantly reduced yield, while their combination positively influenced the dry mass of shoots. The highest productivity was achieved with the CFT system, especially when combined with violet LEDs, which had a higher red light component that stimulates plant growth. It was found that violet lighting significantly outperformed white LEDs, particularly when the nutrient solution was heated.

The most sensitive lettuce varieties to root zone conditions and lighting were Adriana, Cedar, Red Sails, and Salvia. In particular, under violet LEDs, these varieties showed the highest productivity when the CFT system was used.

This research suggests effective strategies for optimizing hydroponic lettuce cultivation in winter greenhouse conditions in Ukraine. The findings can be useful for farmers aiming to increase yield and product quality, as well as for optimizing costs under conditions of limited resources.

Keywords: plant mass, leaf area, root system, hydroponic method, vegetable crops, installation, substrate, mineral solution, hydroponics.

Відомості про авторів

Барановський Віктор Миколайович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри інжинірингу машинобудівних технологій факультету інженерії машин, споруд та технологій Тернопільського національного технічного університету ім. Івана Пулюя.

Борецька Тетяна Юріївна – асистент кафедри машин та обладнання сільськогосподарського виробництва Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна).

Когут Василь Миколайович – асистент кафедри інженерної механіки та технологічних процесів в АПК Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна).

Baranovskyi Viktor – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Engineering of Machine Building Technologies, Faculty of Engineering of Machines, Structures and Technologies of Ternopil Ivan Puluj National Technical University.

Boretska Tetyana – Assistant Professor of the Department of Machinery and Equipment of Agricultural Production of Vinnytsia National Agrarian University (3 Sonyachna St., Vinnytsia, 21008, Ukraine).

Kohut Vasyi – Assistant Professor of the Department of Engineering Mechanics and Technological Processes in the Agricultural Industry of Vinnytsia National Agrarian University (3 Sonyachna St., Vinnytsia, 21008, Ukraine).