

КУПЧУК ІГОР

Вінницький національний аграрний університет

<https://orcid.org/0000-0002-2973-6914>e-mail: kupchuk.igor@i.ua

МЕЛЬНИК ОЛЕКСАНДР

Вінницький національний аграрний університет

<https://orcid.org/0000-0002-0293-0629>e-mail: millermanel@gmail.com

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ОПРОМІНЕННЯ НА ПРОДУКТИВНІСТЬ ПРОЦЕСУ ВИРОЩУВАННЯ РОСЛИННОЇ ПРОДУКЦІЇ В ГІДРОПОННІЙ УСТАНОВЦІ

Актуальними проблемами сільського господарства не тільки України, а й інших держав є підвищення урожайності сільськогосподарських культур, збільшення харчової цінності, якості та зниження собівартості продукції, зменшення потрібних виробничих площ, витрат на сільськогосподарську техніку тощо. У зв'язку із цим, досить перспективними представляються гідропонні установки, які при мінімальних зайнятій площі, капітальних та експлуатаційних витратах, забезпечують цілодобове вирощування широкої номенклатури сільськогосподарських культур, зі скороченням вдвічі періодом одержання урожаю. Широке впровадження гідропонної техніки та технології в Україні дозволить максимально повно реалізувати концепцію малих підприємств, які в даному випадку можуть створюватись практично за відсутності стартового капіталу. Крім цього, використання гідропоніки дозволить одержувати додатковий прибуток або цінну рослинну сировину вже існуючим підприємствам самого різного профілю та невеликим фермерським господарствам.

Гідропоніка – перспективний напрямок розвитку сучасного сільського господарства, що забезпечує багаторічне вирощування основних видів овочів та зелених насаджень на невеликих площах з мінімальними витратами води та добрив. Ця технологія дозволяє отримати досить великий урожай свіжих овочів в межах великих міст, включаючи офісні та житлові приміщення. Основними тенденціями вдосконалення зазначеної технології є розширення номенклатури вирощуваних культур, їх урожайності, більш ефективного використання площ, ґрунту, поживних речовин, мінеральних речовин, води, енергії, зниження собівартості готової продукції.

Стаття присвячена розробці та дослідженню математичної моделі впливу опромінення на продуктивність та якість вирощеної продукції гідропонним методом. Зокрема були отримані залежності для визначення впливу параметрів опромінення на показники розвитку салату використання яких дозволяє прогнозувати розміри та масу рослини, формулюючи підґрунтя для оптимізації режимних параметрів гідропонної установки.

Ключові слова: штучне освітлення, фотосинтетична активна радіація, вегетація, фотосинтез, живлення.

KUPCHUK IHOR, MELNYK OLEXANDER

Vinnytsia National Agrarian University

MATHEMATICAL MODELING OF THE EFFECT OF IRRADIATION ON THE PRODUCTIVITY OF THE PROCESS OF GROWING PLANT PRODUCTS IN A HYDROPONIC UNIT

The actual problems of agriculture not only in Ukraine but also in other countries are to increase crop yields, increase nutritional value, quality and reduce production costs, reduce the required production area, the cost of agricultural machinery, etc. In this regard, hydroponic plants look quite promising, as they provide round-the-clock cultivation of a wide range of crops with minimal space, capital and operating costs, and a halved harvest period. The widespread introduction of hydroponic equipment and technology in Ukraine will allow for the fullest realization of the concept of small enterprises, which in this case can be created with little or no start-up capital. In addition, the use of hydroponics will allow existing enterprises of various profiles and small farms to receive additional income or valuable plant material.

Hydroponics is a promising area of modern agriculture that ensures long-term cultivation of the main types of vegetables and greenery in small areas with minimal water and fertilizer consumption. This technology allows you to get a fairly large harvest of fresh vegetables within large cities, including office and residential premises. The main trends in improving this technology are expanding the range of crops grown, their yields, more efficient use of land, soil, nutrients, minerals, water, energy, and reducing the cost of finished products.

The article is devoted to the development and study of a mathematical model of the influence of irradiation on the productivity and quality of hydroponically grown products. In particular, dependencies were obtained to determine the influence of irradiation parameters on the development of lettuce, the use of which allows predicting the size and weight of the plant, forming the basis for optimizing the operating parameters of the hydroponic plant.

Keywords: artificial lighting, photosynthetic active radiation, vegetation, photosynthesis, nutrition.

Вступ

Можливості сучасного землеробства в плані забезпечення населення нашої планети продуктами харчування мають суттєві обмеження, які значною мірою залежить від родючості ґрунту. В цій ситуації зростає роль гідропонних методів вирощування рослин. Саме гідропонне землеробство дозволяє більш ефективно використовувати воду і добрива, збільшує продуктивність традиційних культур. Так, за даними індійських вчених [1] продуктивність овочів в 2,5-3 рази вище при вирощуванні на гідропонній основі, ніж на відкритому ґрунті. Ще однією перевагою гідропонних систем перед традиційним землеробством є їхня урбаністична привабливість. Гідропонні системи зменшують залежність від ґрунту тому що отримують живлення безпосередньо з гідропонного розчину, який складається з води та поживних речовин. Ще одна перевага гідропонних систем - значно краща пристосованість до урбанізованого середовища. Адже вони

займають набагато меншу площу ніж поля традиційного землеробства, та урожай визріває зовсім поруч зі споживачем. Гідропонні системи в силу своєї компактності мають більше можливостей для регулювання і контролю росту рослин шляхом ретельного управління цілим рядом факторів: складом поживних речовин, параметрами живильного розчину та освітлення. При гідропонному вирощуванні рослин необхідні поживні речовини та елементи розчиняють у відповідних концентраціях для нормального росту рослин [2]. Управління параметрами роботи гідропонної системи є визначальним фактором врожайності та якості культур, що вирощується. Для успішного управління процесами гідропонного вирощування необхідно знати залежності між вхідними та вихідними величинами того або іншого параметра, тобто створити математичну модель впливу цього параметра на розвиток рослин. Саме тому питання створення математичної моделі опромінення рослин при гідропонному процесі вирощування салата наразі є актуальним питанням.

Аналіз останніх публікацій

Аналіз останніх вітчизняних джерел з питань гідропонних систем показує, що недостатньо уваги приділяється саме питанням глибокого вивчення процесів, в тому числі їх математичному опису. В роботі [3] поданий опис основних елементів гідропонної системи, відмічається що важливий вплив на продуктивність та якість вирощеного урожаю відіграє склад субстрату, поданий рекомендований склад саме для даного виду продукції. Всі переваги і недоліки гідропонного способу вирощування овочів проаналізовано в [4] та відмічено, що переваг у гідропонного способу перед традиційним вирощуванням дещо більше ніж недоліків. В зв'язку з цим викликає деяке здивування недостатнім розвитком гідропонного способу в нашій країні. Дане питання потребує додаткового вивчення вченими економістами, агрономами, інженерами тощо.

Вплив складу і особливості вирощування салату Ромен гідропонним способом досліджувались в [5, 6]. Дані роботи ще раз підкреслюють той факт, що для кожного овоча потрібні свої рецепти субстрату, кожен з них має свої особливості та відмінності від інших. Очевидно, що низький рівень універсалізації технології є однією з причин, що стоїть на заваді широкому розповсюдженню гідропонної системи вирощування культур.

Значно більше уваги приділяється гідропонним системам закордонними вченими та спеціалістами. Так в [7] розглянуто моделювання процесу живлення рослин при вирощуванні гідропонним способом. На відміну від попередніх робіт тут розглядається більш докладно модель живлення, яка, зокрема, враховує і фактори опромінення рослин. У роботі [8] розглядається динаміка розвитку рослин на температуру кореневої зони, яка змінюється за рахунок величини опромінення та температури субстрату. Варто зауважити, що зміна температури кореневої зони за рахунок збільшення температури субстрату - не найкращий, з точки зору законів термодинаміки, спосіб. В цій роботі також стверджується, що раціональною температурою для найкращого розвитку кореневої системи рослин є 23-25 °С.

Навіть такий, далеко не повний огляд останніх джерел щодо розвитку гідропонних систем свідчить про те, що наразі не вироблена єдина стратегія розвитку галузі, дослідження особливо в нашій країні, носять на системний, однонаправлений характер. Все це потребує додаткових досліджень, в першу чергу теоретичних, щодо впливу різних факторів на розвиток гідропонних культур, виявлення закономірностей впливу цих факторів на розвиток рослин.

Проведений аналіз останніх досліджень і публікації свідчить про те, що питання, особливо теоретичні, розвитку рослин в гідропонній системі потребують подальшого розвитку. Особливо це стосується питання впливу опромінення на розвиток рослин. Тому дослідження, присвячені розв'язанню цієї проблеми є актуальними та матимуть практичну цінність.

Мета досліджень

Метою дослідження є збільшення ефективності функціонування гідропонних систем шляхом створення математичної моделі впливу опромінення на продуктивність та якість вирощеної продукції.

Результати досліджень

Перш за все, потрібно зробити зауваження, що всі теоретичні та експериментальні дослідження відповідають положенням закону Буцена-Роско [9] стосовно фотосинтезу. В загальних рисах для випадку гідропонних систем сутність закону полягає в тому, що реакція об'єкту (рослини) та випромінювання визначається добутком інтенсивності (яка додається випромінюванням E) На час дії T , тобто дозою $H = E \cdot T$. Іншими словами, величини інтенсивності та експозиції опромінення взаємозамінні, тобто зміна одного з них може бути компенсована відповідною зміною іншої компоненти в зворотню сторону.

Дослідження проводили на гідропонних модулях, які розділені світлонепроникними екранами, які не дозволяють проникати світлу в сусідні секції, але забезпечують циркуляцію повітряних потоків, в лабораторному приміщенні без природного освітлення. В секціях підтримувались температура повітря 18-20°, відносна вологість повітря 60-70%, вміст CO_2 не менше 0,03%, швидкість повітря 0,3-0,5 м/с. Мінеральне споживання рослин здійснювали живильними розчинами, їх склад на протязі досліду залишався постійним. Загальний вигляд секцій представлений на рис. 1.

Мінеральне споживання рослин здійснювали живильними розчинами загального використання. Вимір складу елементів живлення та їх коригування здійснювали вручну для кожного досліду. В якості екстракту застосовувався розчин агроперліту. В якості параметрів оптимізації були використані – час опромінення (фотоперіод) на чотирьох рівнях: $T = 10; 15; 20; 24$ години на добу, а також величина опромінення $E = 12,5; 15; 20; 30$ Вт/м².

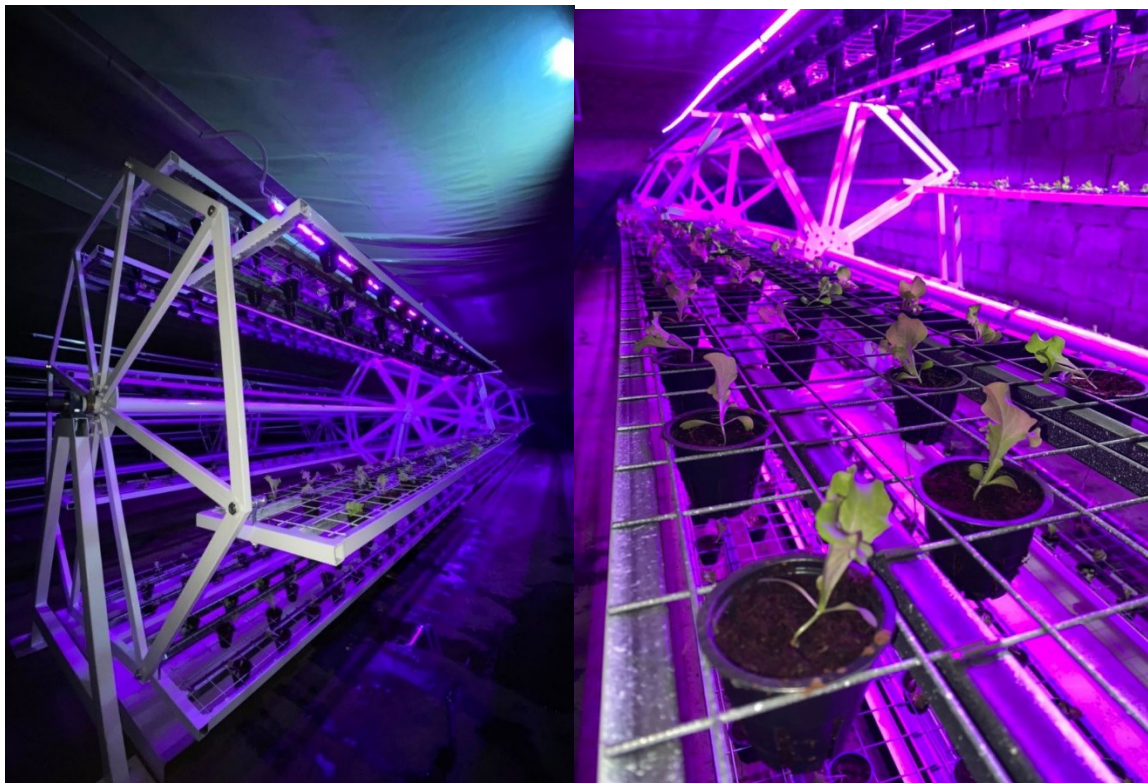


Рис. 1. Загальний вигляд гідропонної установки

Повний експеримент включив себе послідовне проведення чотири серії дослідів, в кожній серії були реалізовані чотири варіанти.

В якості джерел опромінення були використані експериментальні світлодіодні випромінювачі. Потрібний спектри випромінювання задавався пропорцією між синім, зеленим та червоним світлодіодами, а також величиною струму через світлодіоди. Спектральний склад всіх випромінювачів був однаковий, а співвідношення енергії в окремих спектральних діапазонах $k_{\text{син}}=30\%$, $k_{\text{зел}}=20\%$, $k_{\text{чер}}=50\%$. Середнє квадратичне відхилення частки енергії в окремих спектральних діапазонах від середнього складало не більше 2,5%.

Величину випромінювання рослин на протязі всього вегетаційного періоду підтримували на одному рівні шляхом зміни висоти підвіски засобів опромінення. Параметри світлової обстановки рослин наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

ФАР – фотосинтетична активна радіація

Параметр	Дослід 1	Дослід 2	Дослід 3	Дослід 4
Опроміненість ФАР, Вт/м ²	30,0	20,0	15,0	12,5
Освітленість, кЛк	7,94	4,95	3,62	3,09
Фотонна випромінюваність ФАР, МКмоль/с•м ²	142,06	94,09	69,55	59,87

Для об'єктивної оцінки впливу опромінення на розвиток рослин використовували модель яка враховує динаміку зміни площі кожного листа рослини і його маси [10]. Листки з рослин одного віку розділяли на групи, у відповідності з їх номером n, у порядку появи на стеблі. Фіксувались кількість листя на рослині N, їх геометричні розміри (довжину вздовж черешка A_n і найбільшу ширину B_n), сиру масу M_n . Параметри розвитку рослини салата зручно визначати за площею його листка. Попередні дослідження показують що площу листка салату можна визначити за простою формулою $S_n = 0,61 A_n B_n$.

За результатами проведених експериментальних досліджень побудовані графічні залежності площі поверхні листків салату (рис. 2) та маси листя (рис. 3) від опроміненості та фотоперіоду.

Математична обробка результатів дослідів дозволила отримати залежності для визначення впливу параметрів опромінення на показники розвитку салату.

Площа листової поверхні рослини:

$$S = - 1,2T^2 + 60,11T - 1,31E^2 + 70,09E - 819,2 \quad (1)$$

де S – площа листової поверхні рослини салату, см²;

T – фотоперіод, год.;

E – опроміненість, Вт/м²;

Коефіцієнт детермінації для рівняння (1) дорівнює: $R^2 = 0,96$.

Маса листя M_n , г:

$$M_n = -0,06T^2 + 2,21T - 0,03E^2 + 1,62E - 32,01 \quad (2)$$

Коефіцієнт детермінації для цієї моделі: $R^2 = 0,95$.

Значно спростити залежності (1) і (2) можна, якщо використати величину дози опромінення, яка являє собою добуток величини опромінення [Вт/м²] на експозицію процесу опромінення [год]. Ця величина має розмірність [Вт год/м²] і позначається H .

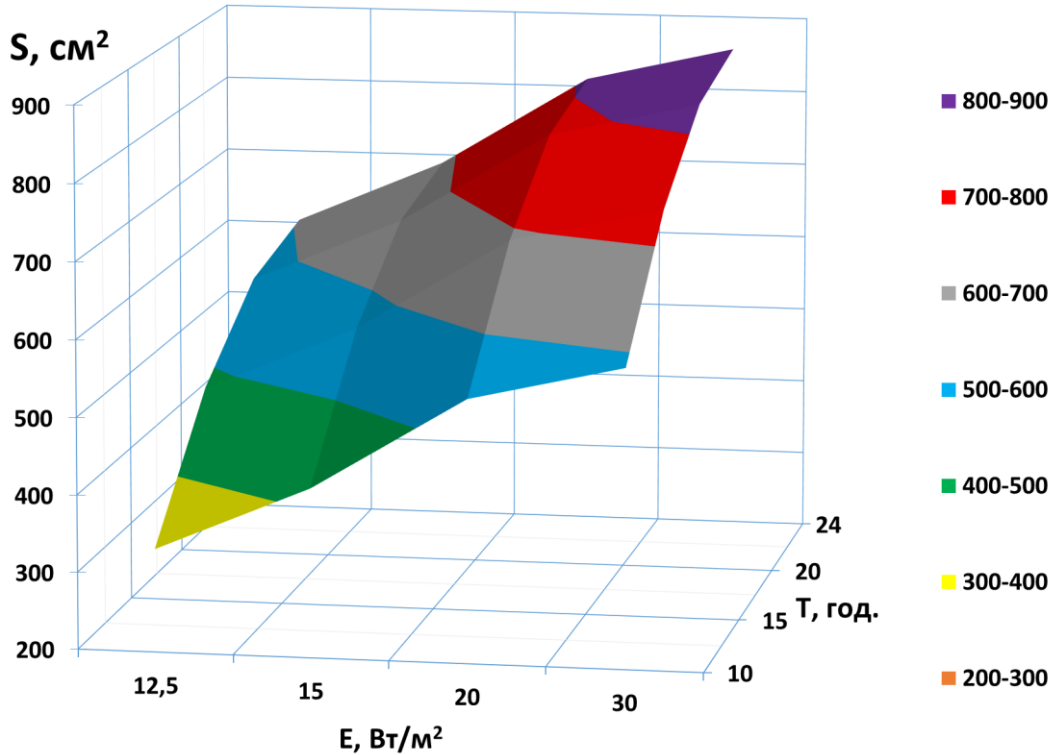


Рис. 2. Залежність площі поверхні листків салату (S , см²) від опроміненості (E , Вт/м²) та фотоперіоду (T , год)

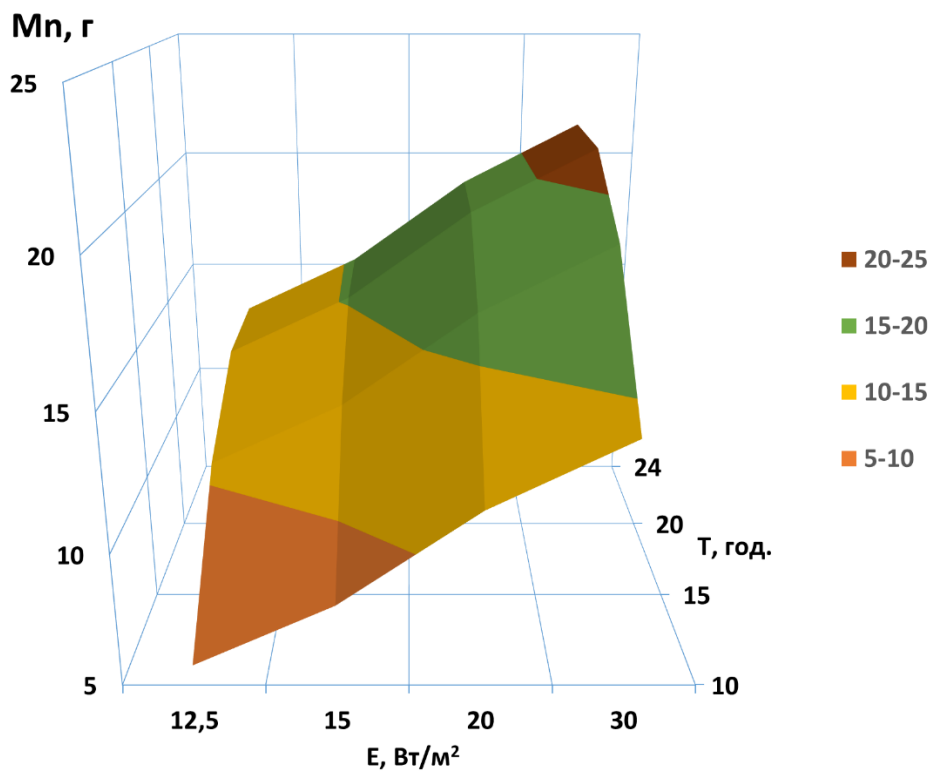


Рис. 3. Залежність маси листя салату (M_n , г) від опроміненості (E , Вт/м²) та фотоперіоду (T , год)

Для площі поверхні листків отримана залежність:

$$S_n = 870,1 \left[1 - \exp\left(-\frac{240,1}{H}\right) \right] \quad (3)$$

Для маси листків:

$$M_n = 46,15 \left[1 - \exp\left(-\frac{850,1}{H}\right) \right] \quad (4)$$

Залежність кількості листків на рослині салату від дози опромінення:

$$N = 0,0071H + 7,4 \quad (5)$$

Оцінка однорідності дисперсій паралельних дослідів була виконана за допомогою критерію Кохрена, його розрахункове значення не перевищує табличного при рівній його значущості 0,05. Перевірку статистичної значущості коефіцієнтів регресії проводили за допомогою критерія Ст'юдента, адекватність моделі – за допомогою критерія Фішера.

Отримані математичні залежності між параметрами навколишнього середовища і продуктивністю рослин дозволяють оптимізувати процес їх росту шляхом підбору необхідних значень зовнішніх параметрів, забезпечуючи при цьому максимальну продуктивність.

Висновки

1. Проведені експериментальні дослідження підтвердили висновки отримані на основі аналізу останніх досліджень і публікацій про значний вплив зовнішніх факторів, зокрема опромінення, на розвиток гідропонних рослин.

2. Отримані математичні моделі дозволяють прогнозувати розміри та масу листків салату залежності від випромінювання.

3. Отримані результати можуть бути використані для знаходження раціональних параметрів одного з чинників зовнішнього впливу на розвиток гідропонних рослин.

Література

1. Singh S, Singh Bs. Hydroponics – A technique for the cultivation of vegetables and medicinal plants. Nutrition and Livelihood Options : Proceedings of 4th Global Conference on Horticulture for Food., India, 2012. 220 p.
2. Yang T, Samarakoon U, Altland J, Ling P. Photosynthesis, biomass production, nutritional quality, and flavor-related phytochemical properties of hydroponic-grown arugula (*Eruca sativa* Mill.) 'standard' under different electrical conductivities of nutrient solution. *Agronomy*. 2021. № 11. P. 13–40. DOI:10.3390/agronomy11071340.
3. Ковальов М.М. Вирощування огірка Козіма F1 на різних типах субстратів у гідропонних купольних теплицях. *Таврійський науковий вісник*. 2021. № 117. С. 80–89.
4. Лавренко С.О., Безручко Н.В. Аеропонічні системи в сучасному світі. *Збірник наукових праць ДВНЗ «ХДАУ»*. 2019. Вип. 33. С. 205–207.
5. Ковальов М., Михайлова Д. Вплив типу субстрату на вирощування мікрозелені салату Ромен в NFT системах. *Досягнення та перспективи галузі виробництва, переробки і зберігання с/г продукції* : мат. Всеукр. н.-пр. конф. Кропивницький : ЦНТУ, 2021. С. 6–8.
6. Ковальов М.М., Васильковська К.В. Вплив сольового складу поживного розчину на вирощування різних сортів салату Ромен в гідропонних колонах. *Сучасний стан науки в с/г та природокористуванні: теорія і практика* : мат. II міжн. наук. інтернет-конф. Тернопіль. 2020. С. 83–86.
7. Barbieri G., Quintero G., Otero J. et al. A mathematical model to enable the virtual commissioning simulation of wick soilless cultivations. *Journal of Engineering Science and Technology*. 2021. Vol. 16, № 4. P. 3325–3342.
8. Aji G.K., Haton K., Morimoto T. Modeling the dynamic response of plant Growth to root zone temperature in hydroponic Chili pepper plant using neural networks. *Agriculture*. 2020. 10 (6). 234. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture10060234>
9. Довідник хіміка 21 : веб-сайт. URL: <https://chem21.info/> (дата звернення: 15.01.2024).
10. Fageria Vd. Nutrient interactions in crop plants. *Journal of Plant Nutrition*. 2021. 24 (8). P. 1269–1290. DOI: 10.1081/PLN-100106981.

References

1. Singh, S, Singh, Bs. (2012). Hydroponics – A technique for the cultivation of vegetables and medicinal plants. Proceedings of 4th Global Conference on Horticulture for Food: Nutrition and Livelihood Options. (220 p.) India.
2. Yang, T, Samarakoon, U, Altland, J, Ling, P. (2021). Photosynthesis, biomass production, nutritional quality, and flavor-related phytochemical properties of hydroponic-grown arugula (*Eruca sativa* Mill.) 'standard' under different electrical conductivities of nutrient solution. *Agronomy*, 11, 13-40. DOI: 10.3390/agronomy11071340 [in English].
3. Kovalov, M.M. (2021). Vyroshchuvannya ohirka Kozima F1 na riznykh typakh substrativ u hidropornykh kupol'nykh teplotytsyakh [Growing Kozima F1 cucumber on different types of substrates in hydroponic dome greenhouses]. *Tavriys'kyi naukovyy visnyk – Taurida Scientific Herald*, № 117, 80-89 [in Ukrainian].
4. Lavrenko, S.O., Bezruchko, N.V. (2019). Aeroponichni systemy v suchasnomu sviti [Aeroponic systems in the modern world]. *Zbirnyk naukovykh prats' DVNZ «KHDAU» – Collection of scientific papers of the State Higher Educational Institution «KhSAU»*, 33, 205-207 [in Ukrainian].
5. Kovalov, M., Mykhailova, D. (2021). Vplyv typu substratu na vyroshchuvannya mikrozeleni salatu Romen v NFT systemakh

[Influence of substrate type on the cultivation of Romaine lettuce microgreens in NFT systems]. Mat. All-Ukrainian scientific and industrial conf. «Achievements and prospects of the agricultural production, processing and storage industry». (p. 6-8). Kropyvnytskyi: CSTU [in Ukrainian].

6 Kovalov, M.M., Vasytkovska, K.V. (2020). Vplyv sol'ovoho skladu pozhyvnoho rozchynu na vyroshchuvannya riznykh sortiv salatu Romen v hidroponnykh kolonakh [Influence of the salt composition of the nutrient solution on the cultivation of different varieties of Romaine lettuce in hydroponic columns]. Proceedings of the II international scientific. Internet conf. «Current state of science in agriculture and nature management: theory and practice». p. 83-86. Ternopil [in Ukrainian].

7 Barbieri, G., Quintero, G., Otero, J. et al. (2021). A mathematical model to enable the virtual commissioning simulation of wick soilless cultivations. *Journal of Engineering Science and Technology*, Vol. 16, № 4, 3325-3342 [in English].

8 Aji, G.K., Haton, K., Morimoto, T. (2020). Modeling the dynamic response of plant Growth to root zone temperature in hydroponic Chili pepper plant using neural networks. *Agriculture*, 10 (6), 234. DOI:<https://doi.org/10.3390/agriculture10060234> [in English].

9 Dovidnyk khimika 21 [Chemist's handbook 21]. Retrieved from <https://chem21.info> [in Ukrainian].

10 Fageria, Vd. (2021). Nutrient interactions in crop plants. *Journal of Plant Nutrition*, 24 (8), 1269-1290. DOI: 10.1081/PLN-100106981 [in English].