

meteorological droughts in Ukraine. *International Journal of Climatology*. 2024. Vol. 44, No. 6. P. 1849–1866. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.8416>.

3. Ma Y., Freitas H., Dias M. C. Strategies and prospects for biostimulants to alleviate abiotic stress in plants. *Frontiers in Plant Science*. 2022. Vol. 13. Art. 1024243. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1024243>.

4. Wu W., Han J., Gu Y., Li T., Xu X., Jiang Y., Li Y., Sun J., Pan G., Cheng K. Impact of biochar amendment on soil hydrological properties and crop water use efficiency: a global meta-analysis and structural equation model. *GCB Bioenergy*. 2022. Vol. 14, No. 6. P. 657–668. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcbb.12933>.

5. Ahmad H. M., Fiaz S., Hafeez S., Zahra S., Shah A. N., Gul B., Aziz O., Mahmood-Ur-Rahman, Fakhar A., Rafique M., Chen Y., Yang S. H., Wang X. Plant growth-promoting rhizobacteria eliminate the effect of drought stress in plants: a review. *Frontiers in Plant Science*. 2022. Vol. 13. Art. 875774. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.875774>.

6. Mir R. A., Bhat B. A., Yousuf H., Islam S. T., Raza A., Rizvi M. A., Charagh S., Albaqami M., Sofi P. A., Zargar S. M. Multidimensional role of silicon to activate resilient plant growth and to mitigate abiotic stress. *Frontiers in Plant Science*. 2022. Vol. 13. Art. 819658. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.819658>.

7. Moura O. V. T. de, Berbara R. L. L., Torchia D. F. de O., Silva H. F. O. da, Castro T. A. van T. de, Tavares O. C. H., Rodrigues N. F., Zonta E., Santos L. A., García A. C. Humic foliar application as sustainable technology for improving the growth, yield, and abiotic stress protection of agricultural crops. A review. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*. 2023. Vol. 22, No. 8. P. 493–513. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2023.05.001>.

8. Borzoo S., Mohsenzadeh S., Moradshahi A., Kahrizi D., Zamani H., Zarei M. Characterization of physiological responses and fatty acid compositions of *Camelina sativa* genotypes under water deficit stress and symbiosis with *Micrococcus yunnanensis*. *Symbiosis*. 2021. Vol. 83, No. 1. P. 79–90. DOI: 10.1007/s13199-020-00733-5.

СВІТЛОДІОДНЕ ОПРОМІНЕННЯ ЯК ЧИННИК РЕГУЛЯЦІЇ АРХІТЕКТОНІКИ ТА ПРОДУКТИВНОСТІ ПЕРЦЮ В ГІДРОПОНІЦІ

Ковальов М. М., к. с.-г. н., доцент

Центральноукраїнський національний технічний університет,
м. Кропивницький, Україна

У світлокультурі овочевих рослин режим світлодіодного опромінення зазвичай описують трьома параметрами – щільністю потоку фотонів фотосинтетично активної радіації (PPFD), спектральним складом і фотоперіодом [1]. Четвертий параметр – просторова орієнтація потоку відносно рослини – у технологічних регламентах практично не враховується, хоча саме він визначає глибину проникнення фотонів у крону та рівномірність їх розподілу між ярусами

листя [2, 3]. Водночас напрямок падіння світла є для рослини морфогенетичним сигналом: асиметрію освітленості вона сприймає фоторецепторами й відповідає на неї фототропічним вигином осі та перебудовою архітекtonіки [4].

Для томата встановлено, що поєднання верхнього та внутрішньокронового досвічування забезпечує вищий урожай, ніж кожне з них окремо [5], а для солодкого перцю бічне досвічування підвищувало суху масу пагона й урожай плодів на 17–20 % [6, 7]. Проте зміщення джерела вбік несе ризик викривлення стебел і однобічного розвитку крони. Для вітчизняних установок зі штучним кліматом, де освітлення формує основну частку енерговитрат [8], особливо цінні рішення, що підвищують віддачу без нарощування встановленої потужності. До таких належить перекомпонування наявних світильників у модульних системах періодичного затоплення, поширених у навчальних закладах і малих господарствах [9].

Мета роботи – оцінити, як геометрія світлового поля світлодіодних джерел за незмінної інтенсивності опромінення регулює архітекtonіку куща, накопичення біомаси та закладання генеративних органів перцю гострого (*Capsicum annuum* L.) сорту Угорський жовтий у гідропоніці.

Однофакторний дослід проведено в модулі періодичного затоплення (Flood & Drain) у приміщенні з повністю штучним освітленням. Порівнювали три схеми опромінення: А – вертикальну згори (90°, контроль), Б – похилу згоризбоку (45°), В – комбіновану (70 % потоку згори та 30 % збоку під кутом 45°). Щоб відокремити ефект напрямку від ефекту інтенсивності, PPFD на рівні верхнього ярусу листя в усіх варіантах вирівнювали за квантовим датчиком до $200 \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, щотижня коригуючи висоту підвісу панелей; без такої корекції похиле падіння, згідно із законом косинуса, знизило б освітленість горизонтальної поверхні приблизно на 29 %. Фотоперіод становив 14 год, спектр – червоний 660 нм / синій 450 нм, ЕС розчину – $1,8\text{--}2,2 \text{ мСм} \cdot \text{см}^{-1}$, рН – 5,8. Облікова одиниця – рослина, повторність п'ятиразова, обліки – на 0, 7, 14, 21 і 28-у добу. Архітекtonіку характеризували висотою рослини H , діаметром стебла d , кутом відхилення осі від вертикалі, індексом асиметрії крони $I_a = R_{\text{осв}}/R_{\text{зат}}$ (відношення радіусів проєкції крони з освітленого та затіненого боків) та індексом компактності $I_c = H/d$. Дані опрацьовано дисперсійним аналізом із розрахунком НІР₀₅ та кореляційно-регресійним аналізом [10].

Зміна напрямку опромінення по-різному вплинула на лінійний ріст і потовщення стебла (табл. 1). На 28-у добу рослини варіанта Б поступалися контролю за висотою на 10,7 %, а варіанта В – перевищували його на 3,6 %, тоді як діаметр стебла зріс в обох дослідних варіантах – на 14,3 і 28,9 %. Через цю різноспрямованість найчутливішим інтегральним показником архітекtonіки виявився індекс компактності: у контролі він за 28 діб зріс із 32,58 до 33,89, що свідчить про поступове витягування рослин, а в дослідних варіантах знизився до 26,48–27,24 (рис. 1, а); схема опромінення пояснювала понад 99 % його мінливості.

Таблиця 1

**Показники архітекτονіки та продуктивності перцю гострого на 28-у добу
залежно від схеми світлодіодного опромінення**

Показник	А (90°, контроль)	Б (45°, похиле)	В (70+30 %)	НІР ₀₅
Висота рослини, см	20,40	18,22	21,14	0,38
Діаметр стебла, мм	6,02	6,88	7,76	0,13
Індекс компактності I_c	33,89	26,48	27,24	0,21
Кут відхилення стебла, град	1,1	20,1	5,0	0,45
Індекс асиметрії крони I_a	1,022	1,824	1,060	—*
Загальна суха маса, г	7,85	9,33	10,33	0,42
Суха маса кореневої системи, г	1,75	2,18	2,41	0,13
Бутони і квітки, шт./рослину	8,6	10,6	13,6	0,75
Сформовані плоди, шт./рослину	4,6	6,6	7,6	0,75

*Примітка. Наведено середні значення по 5 рослинах у варіанті; * індекс асиметрії крони фіксували як усереднену характеристику варіанта, тому НІР₀₅ не розраховували.*

Фототропічна відповідь виявилася нелінійною щодо частки бічного потоку (рис. 1, б). За повністю похилого опромінення вісь стебла відхилилася на 20,1°, а індекс асиметрії крони досяг 1,824, тобто крона набула вираженої односторонності, неприйнятної для вирощування без опор. У комбінованому варіанті ці показники становили лише 5,0° і 1,060: зменшення бічної складової приблизно втричі послабило деформацію вчетверо. Імовірно пояснення полягає в тому, що величина фототропічного вигину залежить від контрасту освітленості між боками органа [4], а потужна вертикальна складова цей контраст знижує.

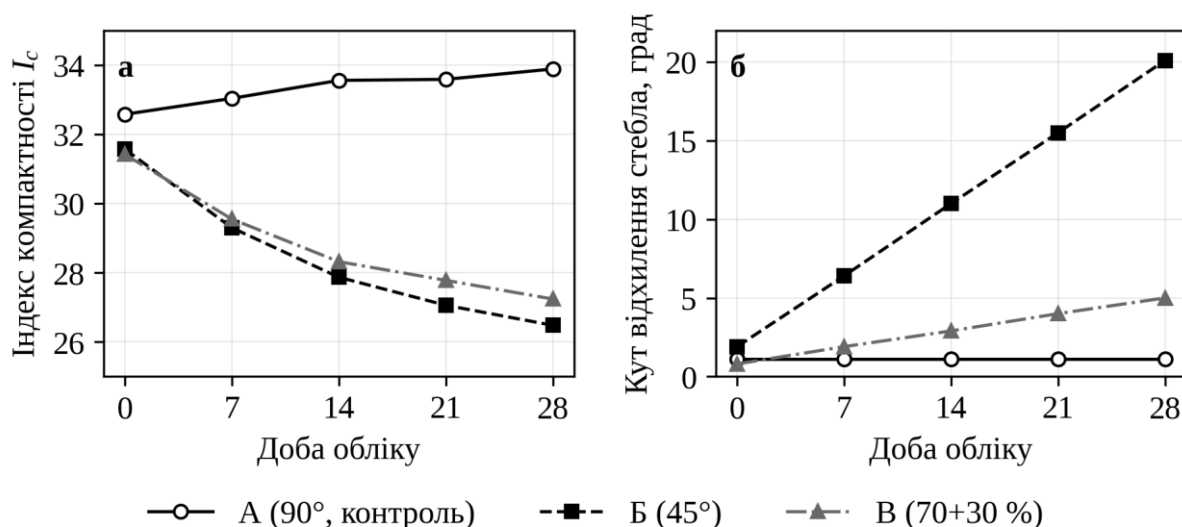


Рис. 1. Динаміка індексу компактності (а) та кута відхилення стебла (б) перцю гострого за різних схем світлодіодного опромінення

Загальна суха маса рослин у варіантах Б і В перевищила контроль на 18,9 і 31,6 % (табл. 1), причому коренева система реагувала сильніше (+24,6 і 37,7 %), ніж надземна частина (+17,2 і 29,8 %). Оскільки абсолютна маса пагона також істотно зросла, йдеться не про перерозподіл обмеженого ресурсу між органами, а про поліпшення вуглецевого балансу рослини загалом – найімовірніше, завдяки залученню до нетто-асиміляції нижніх листків, які за вертикального опромінення затінювалися. Згідно з концепцією функціональної рівноваги, частка кореня зростає переважно за дефіциту кореневого живлення [11], проте в досліді живлення не лімітувало ріст, а PPFD була вирівняною, тож зростання частки кореня в сухій масі з 22,3 до 23,3–23,4 % є наслідком загального збільшення асиміляційного ресурсу, а не реакцією на стрес. Найчутливішою до геометрії світлового поля виявилася генеративна сфера: кількість бутонів і квіток на 28-у добу зросла на 23,3 і 58,1 %, сформованих плодів – на 43,5 і 65,2 %. Схеми діяли різними шляхами: комбінована – через закладання більшої кількості вузлів (8,81 проти 7,85 у контролі), похила – через вищий коефіцієнт реалізації генеративних утворень (62,2 проти 53,3 %).

Діаметр стебла тісно корелював із загальною сухою масою ($r = +0,982$), а залежність описується рівнянням $M = 1,447d - 0,793$ ($R^2 = 0,964$), тоді як висота рослини істотного зв'язку з масою не мала ($r = +0,176$), оскільки вона є похідною кількох різноспрямованих процесів, що по-різному регулюються світловими сигналами [12]. Це відкриває можливість неруйнівного контролю накопичення біомаси в гідропонному модулі одним вимірюванням штангенциркулем. Кут відхилення стебла з продуктивністю не корелював ($r = +0,299$; $p = 0,279$), отже, приріст маси й деформацію куща можна регулювати незалежно, добираючи частку бічного потоку.

Отже, світлодіодне опромінення регулює архітектуру та продуктивність перцю гострого не лише кількістю, а й напрямком потоку фотонів. Для модульних гідропонних установок доцільна комбінована схема (70 % потоку згори та 30 % збоку під кутом 45°) за обов'язкового приладового вирівнювання PPFD: вона забезпечує найбільший приріст сухої маси (31,6 %) і кількості плодів (65,2 %) за технологічно прийнятної форми куща та реалізується перекомпонуванням наявного обладнання без додаткової потужності. Результати мають попередній характер і потребують перевірки в повному циклі вегетації до збирання товарних плодів з уточненням оптимальної частки бічної складової.

Література

1. Paradiso R., Proietti S. Light-quality manipulation to control plant growth and photomorphogenesis in greenhouse horticulture: the state of the art and the opportunities of modern LED systems. *Journal of Plant Growth Regulation*. 2022. Vol. 41. P. 742–780. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00344-021-10337-y>
2. Schipper R., van der Meer M., de Visser P. H. B., Heuvelink E., Marcelis L. F. M. Consequences of intra-canopy and top LED lighting for uniformity of light

distribution in a tomato crop. *Frontiers in Plant Science*. 2023. Vol. 14. Article 1012529. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1012529>

3. Hwang I., Yoon S., Kim D., Kang J. H., Kim J. H., Son J. E. Evaluation of the effects of supplemental lighting and stem number on greenhouse sweet pepper growth and yield via ray-tracing simulation with 3D plant models. *Biosystems Engineering*. 2023. Vol. 226. P. 252–265. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2023.01.010>

4. Lv Q.-Y., Zhao Q.-P., Zhu C., Ding M., Chu F.-Y., Li X.-K., Cheng K., Zhao X. Hydrogen peroxide mediates high-intensity blue light-induced hypocotyl phototropism of cotton seedlings. *Stress Biology*. 2023. Vol. 3, No. 1. Article 24. DOI: <https://doi.org/10.1007/s44154-023-00111-3>

5. Ziaei N., Talebi M., Sayed Tabatabaei B. E., Sabzalian M. R., Soleimani M. Intra-canopy LED lighting outperformed top LED lighting in improving tomato yield and expression of the genes responsible for lycopene, phytoene and vitamin C synthesis. *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14. Article 19022. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-69210-z>

6. Kim D., Moon T., Kwon S., Hwang I., Son J. E. Supplemental inter-lighting with additional far-red to red and blue light increases the growth and yield of greenhouse sweet peppers (*Capsicum annuum* L.) in winter. *Horticulture, Environment, and Biotechnology*. 2022. Vol. 63. P. 415–425. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13580-022-00450-6>

7. Kim D., Son J. E. Adding far-red to red and blue supplemental light-emitting diode interlighting improved sweet pepper yield but attenuated carotenoid content. *Frontiers in Plant Science*. 2022. Vol. 13. Article 938199. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.938199>

8. Weidner T., Yang A., Hamm M. W. Energy optimisation of plant factories and greenhouses for different climatic conditions. *Energy Conversion and Management*. 2021. Vol. 243. Article 114336. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114336>

9. Ковальов М.М. Вирощування мікрозелені салату ромен у NFT-системах залежно від впливу типу субстрату. *Зрошуване землеробство: міжвідомчий тематичний науковий збірник. Видавничий дім «Гельветика»*. 2021, вип. 75. С. 48-52. DOI <https://doi.org/10.32848/0135-2369.2021.75.9>

10. Ушкаренко В. О., Вожегова Р. А., Голобородько С. П., Коковіхін С. В. Методика польового дослідження (Зрошуване землеробство) : навч. посіб. Херсон : Грінь Д. С., 2014. 448 с.

11. Poorter H., Niklas K. J., Reich P. B., Oleksyn J., Poot P., Mommer L. Biomass allocation to leaves, stems and roots: meta-analyses of interspecific variation and environmental control. *New Phytologist*. 2012. Vol. 193, No. 1. P. 30–50. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2011.03952.x>

12. Nie W.-F., Li Y., Chen Y., Zhou Y., Yu T., Zhou Y., Yang Y. Spectral light quality regulates the morphogenesis, architecture and flowering in pepper (*Capsicum annuum* L.). *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*. 2023. Vol. 241. Article 112673. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2023.112673>