*В роботі представлені результати досліджень умов росту та розвитку рослин закритого ґрунту при опроміненні світлодіодами (СД) та компактними люмінесцентними лампами (КЛЛ). Проведено аналіз світлотехнічних та енергетичних параметрів опромінювальних пристроїв (ОП). Виходячи з розрахунку енерговитрат ОП, запропоновано енергоощадні опромінювачі та подано значення їх енергетичної ефективності.*

**УДК 628.979; 621. 273**

**В. А. Андрійчук**,
докт. техн. наук,
**М. І. Гнатович**, асп.
*Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя*
**А. І. Герц,** канд. біол. наук,
*Тернопільський національний педагогічний університет імені Володимира Гнатюка*

# *ЕНЕРГООЩАДНІ ДЖЕРЕЛА СВІТЛА ДЛЯ СВІТЛОКУЛЬТУРИ РОСЛИН*

Вирощування рослин в закритому ґрунті вимагає дотримання ряду параметрів, серед яких особливе місце займає світловий режим, який через процеси фотосинтезу пов'язаний з ростом і розвитком рослин. Підвищення ефективності фотосинтезу сприяє кращому функціонуванню асиміляційної системи, яка бере участь у фіксації та первинних етапах перетворення енергії світла і залежить від вибору джерел випромінювання як за спектральними, так і за енергетичними характеристиками [1].

Для світлокультури рослин традиційно застосовували широкий асортимент джерел світла (ДС), які мають свої особливості. Лампи розжарювання через свою низьку світлову віддачу не знайшли широкого використання, але для підвищення частки червоного випромінювання застосовувались в комплексі з іншими джерелами світла. Розрядні лампи високого тиску (ксенонові, ртутні, металогалогенні, натрієві) донедавна були найбільш вживані у світлокультурі рослин. Ксенонові лампи високої інтенсивності мають спектр випромінювання, який з усіх джерел світла найбільше наближається до сонячного. Головні недоліки цих ламп - висока вартість, складна схема живлення, низький ККД, малий термін експлуатації - від 500 до 2000 годин [2].

Ртутні лампи високого тиску з люмінофорним покриттям колби мають лінійчастий спектр з великими інтервалами між лініями. Максимальне випромінювання припадає на зелену (500 нм) і синю (436 нм) області спектру. Через відсутність в спектрі цих ламп випромінювання в червоній (640-680 нм) області, вони мало придатні для вирощування рослин в умовах штучного опромінювання [2]. З названих типів ламп тривалий час в тепличному господарстві використовувались лампи ДРЛФ-400 з люмінофором, який доповнював спектр червоним свіченням. Лампи типу ДРЛФ через низькі енергетичні параметри в даний час не використовуються.

Металогалогенні лампи (МГЛ) високого тиску мають широкі можливості регулювання спектру випромінювання за рахунок введення в розряд хімічних елементів. На сьогодні майже всіма провідними виробниками розроблені МГЛ для рослинництва. ККД цих ламп в області ФАР досягає 20-25 %. Головний їх недолік – низька стабільність світлових параметрів у процесі експлуатації, залежність ККД і спектрального складу випромінювання від напруги мережі живлення [2].

Натрієві джерела світла, завдяки своїй високій ефективності, змістили на другий план металогалогенні лампи типу ДРІ [2]. Їх спектр випромінювання зосереджений в жовтій ділянці спектру до якого рослини найчутливіші. Тому натрієві лампи частіше використовують для вирощування рослин в закритому ґрунті.

З появою енергоощадних та напівпровідникових джерел світла постала проблема розширення можливості їх застосування у світлокультурі рослин. Визначення впливу їх випромінювання на ріст і розвиток рослин закритого ґрунту є актуальним і має як теоретичне, так і практичне значення. Розрядні лампи низького тиску (компактні люмінесцентні лампи) мають високу світлову ефективність і широкі можливості регулювання спектрального складу випромінювання за рахунок застосування різних люмінофорів. Термін роботи ламп складає 12000-15000 годин.

Набагато кращі перспективи мають напівпровідникові джерела світла. Широкий асортимент світлодіодів за спектральним складом, що перекриває весь видимий діапазон та відсутність теплого випромінювання робить їх перспективними джерелами для світлокультури рослин.

Метою роботи було здійснити порівняльну характеристику параметрів росту і розвитку рослин, що вирощувались при освітленні різними типами ДС та підбір найбільш ефективних.

Для досягнення поставленої мети, необхідно було вирішити наступне завдання: дослідити вплив випромінювання енергоощадних та напівпровідникових ДС на процеси росту та розвитку рослин. Відтак, було проведено аналіз світлової віддачі найбільш поширених ДС (табл. 1) [3].

**Таблиця 1.**

**Значення енергетичної ефективності типових джерел світла**

| Загальні характеристики | Значення енергетичної ефективності типових джерел світла, лм/Вт |
|---|---|
| Лампи розжарення | 15-24 |
| Ртутні лампи високого тиску | 50-55 |
| Метало-галогенні лампи | 65-115 |
| Натрієві лампи високого тиску | до 150 |
| Люмінесцентні лампи (Т12, КЛЛ, Т8, Т5) | 50-72 |
| Світлодіоди (СД) | до 150 |

Таким чином, серед сучасних джерел випромінювання найкращі параметри енергоефективності мають компактні люмінесцентні лампи та напівпровідникові випромінювачі, а також натрієві джерела світла.

Для проведення експериментальних досліджень було вибрано міні-теплиці типу «Флора» з КЛЛ типу Osram Duluxstar 18W/840, а також СД білого кольору свічення, типу МТК2-4,8. При цьому дотримувались постійної температури середовища – 19 - 21 ˚С та режиму роботи опромінювальних пристроїв (16 годин опромінення). Використовували наступні опромінювальні пристрої (ОП):

1) ОП 1 – світлодіодна матриця, розмірами 0,31м × 0,31 м, що складалася з 288 СД типу МТК2-4,8 білого кольору свічення, рівень опромінення – 2,5-3 клк, споживана потужність – 17,3W ;

2) ОП 2 – лампа КЛЛ типу Osram Duluxstar 18W, рівень опромінення – 1,5 клк, споживана потужність – 18 W;

3) ОП 3 – СД матриця, що складалась з 60 білих СД типу МТК2-4,8, рівень опромінення – 1,5 клк, споживана потужність 3,6W;

В якості контрольного ОП використали ОП на основі 2-х КЛЛ типу Osram Duluxstar 18W з рівнем опромінення – 2,5-3 клк, споживана потужність – 36 W.

Для досліджень було взято сою культурну сорту Аннушка. Даний сорт селекційно-нвсінницької фірми «Соєвий вік» внесений до Держреєстру сортів рослин України на 2007 рік і визнаний національним стандартом до скоростиглої групи сортів сої. Сорт володіє високим потенціалом продуктивності, не має аналогів за скоростиглістю.

Вимірювання ростових параметрів та пігментного складу проводили на 6, 8, 11 та 14 день вегетації.

Визначали такі показники, як індекс росту, площу листкової поверхні, суху та сиру біомасу рослин, чисту продуктивність фотосинтезу, вміст хлорофілів (*a, b*) і каротиноїдів.

Висоту рослин сої вимірювали від поверхні ґрунту до точки росту. Для вимірювань використовували 20 постійно виділених рослин кожного варіанту [5].

Інтенсивність росту рослин сої оцінювали за індексом росту, який розраховували за формулою (1) [4]:

$$X = (h_2 - h_1) * \frac{100\%}{h_1}, \quad (1)$$

де X - індекс росту, %

$h_1$ і $h_2$ – висота рослин під час першого і другого вимірювання, см.

Відбирали 5 рослин, зрізали та ділили на листки та стебла, зважували їх сиру масу та визначали площу. Після чого сирі зразки просушували і зважували їх суху масу.

Площу визначали контурним методом [4], вміст пігментів за Верноном [4].

Концентрацію розраховували за рівняннями (2-4) [4]:

$$C_a = 11{,}63 * D_{665} - 2{,}39 * D_{649} \quad (2)$$

$$C_b = 20{,}11 * D_{649} - 5{,}18 * D_{665} \quad (3)$$

$$C_{кар} = 4{,}695 * D_{440{,}5} - 0{,}268 * (C_{a+b}) \quad (4)$$

Чисту продуктивність фотосинтезу розраховували за формулою (5) [4]:

$$ЧФП = \frac{B_2 - B_1}{0{,}5 * (Л_1 + Л_2) * n}, \quad (5)$$

де ЧПФ – чиста продуктивність фотосинтезу, г/м$^2$ за добу;

$B_1$ і $B_2$ – маса сухої речовини рослин на початку і в кінці облікового періоду,г;

$(B_2 - B_1)$ – приріст маси сухої речовини за п днів, г;

$Л_1$ і $Л_2$ – площа листків на початку і в кінці облікового періоду, м$^2$;

$0{,}5*(Л_1 + Л_2)$ – середня робоча площа листкової поверхні за час досліду;

n – період між двома спостереженнями, днів.

На рис. 1 та в табл. 2 наведені результати дослідження динаміки ростових показників сої культурної при опроміненні ОП 1. На 6 день індекс росту на 34% нижчий від контрольного ОП, на 8 та 11 дні – вищий на 39%, та 18% відповідно.

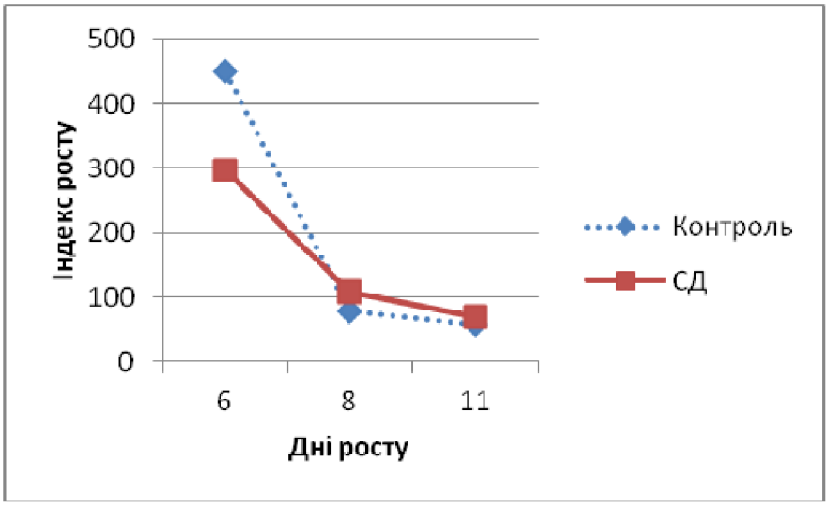


Рис. 1 - Динаміка зміни індексу росту рослини в залежності від умов опромінення

Вплив умов опромінення на інші показники ростових процесів приведені на рис. 2 – 6.

**Таблиця 2.**

**Індекс росту рослин сої культурної сорту Аннушка**

| Дні росту і розвитку | Контроль | ОП 1 |
|---|---|---|
| 6 день | 451,2 | 297,9 |
| % до контролю | - | 65,9 |
| 8 день | 78,1 | 108,3 |
| % до контролю | - | 138,7 |
| 11 день | 59 | 69,5 |
| % до контролю | - | 117,8 |

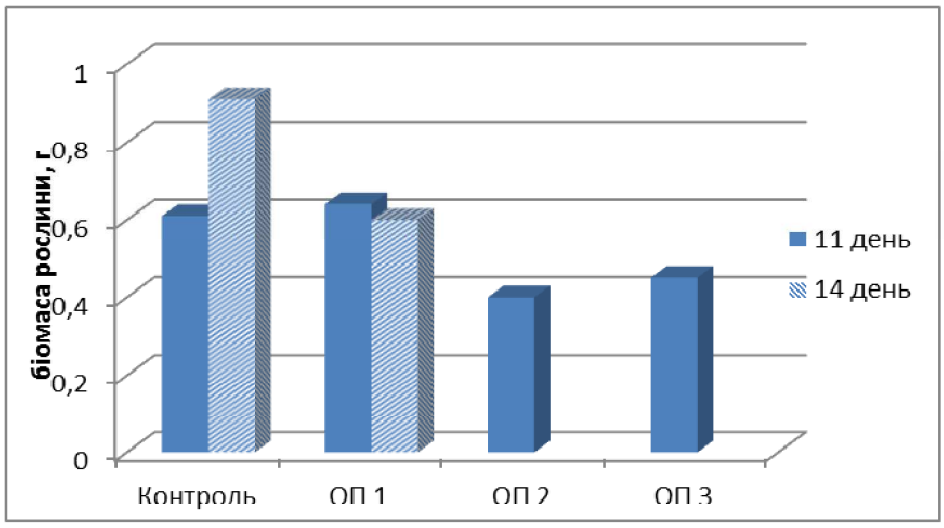


Рис. 2 - Залежність біомаси рослини від умов опромінення

Згідно з одержаними результатами, при опроміненні ОП 3 та ОП 2 на 11 день сира маса листків зменшилась на 10 % та на 20 % відповідно, при опроміненні ОП 1 – збільшилась на 30 %, та зменшилась на 41 % на 14 день відносно контролю (рис.3).

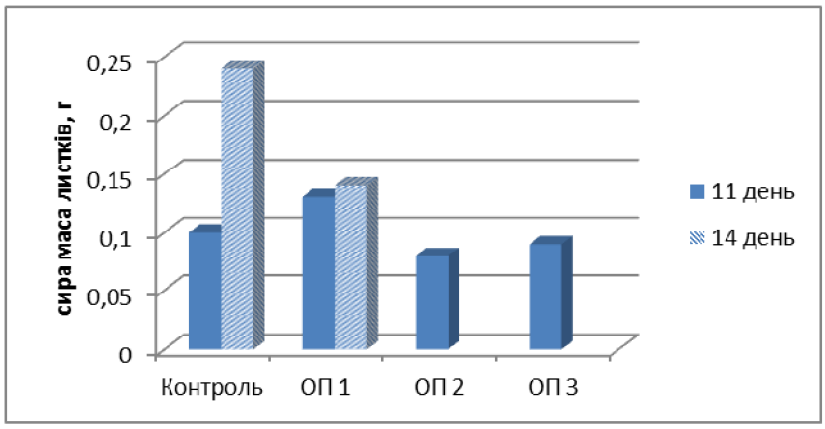


Рис. 3 - Залежність сирої маси листків від умов опромінення

Суха біомаса на 11 день при опроміненні ОП 1 – залишилась такою ж як і в контрольного зразка, ОП 3 та ОП 2 знизилась на 20 %, а на 14 день при опроміненні ОП 1 зменшилась на 50 % (рис. 4), суха маса листків на 11 день при освітленні ОП 3 та ОП 2 – така ж як і в контрольного зразка, ОП 1 – збільшилась у 2 рази, а на 14 день зменшилась у 2 рази відносно контролю, причиною цього може бути недостатність збалансованості спектрального складу (рис. 5).

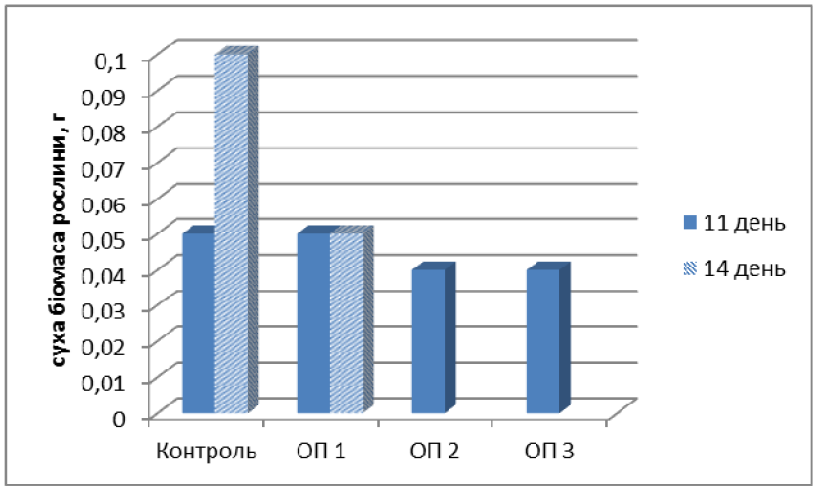


Рис.4 - Залежність сухої біомаси рослини від умов опромінення

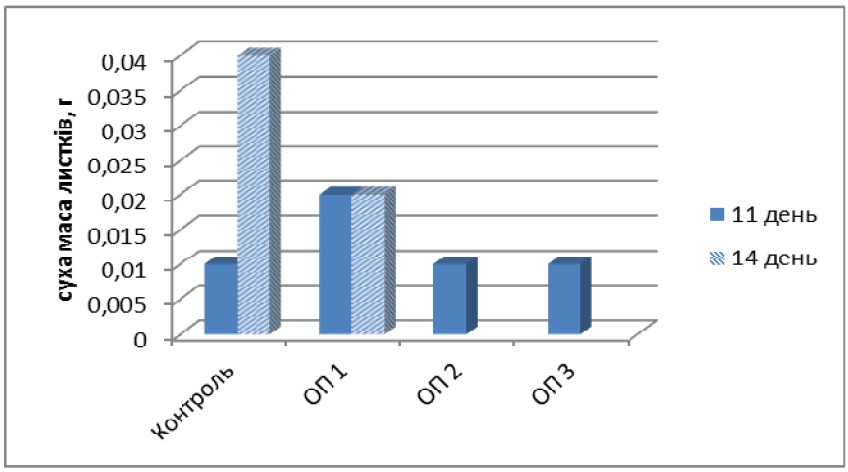


Рис. 5 - Залежність сухої маси листків від умов опромінення

На рис. 6 наведені результати вимірювання площі листкової поверхні рослини. При опроміненні ОП 1 на 11 день нами відзначено збільшення площі листків на 43 %, а на 14 – її зменшення на 45 % відносно контрольного зразка.

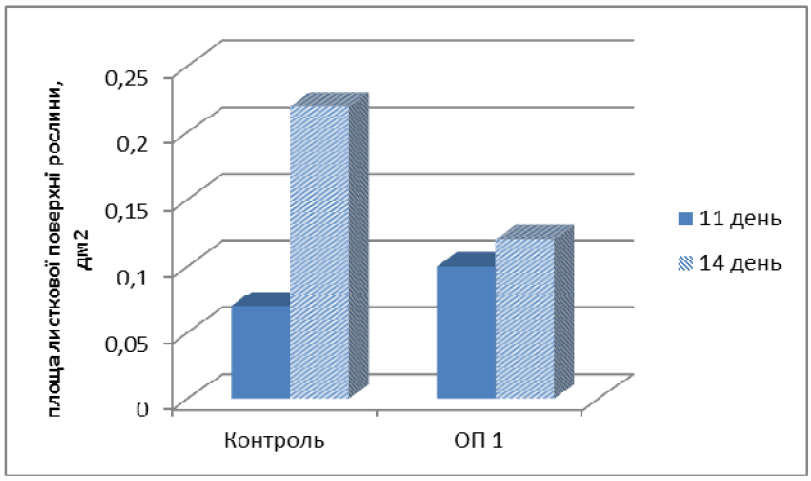


Рис.6 - Залежність площі листкової поверхні рослини від умов опромінення

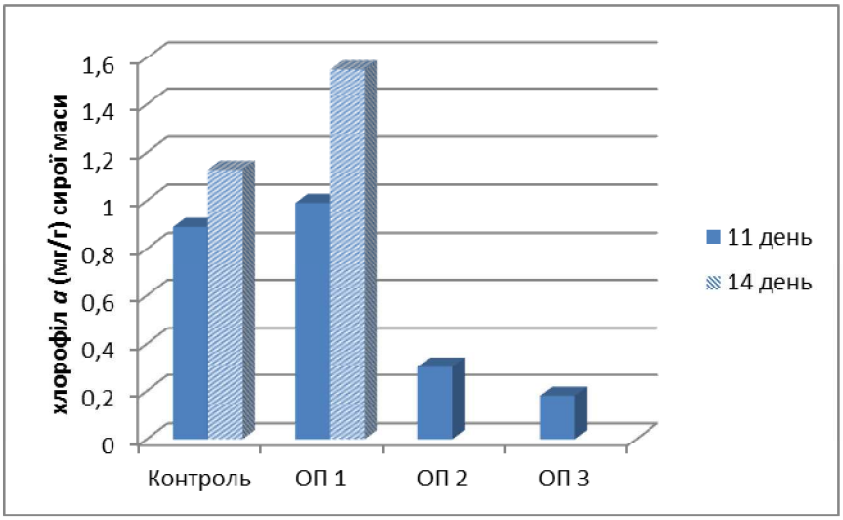


Рис. 7 - Залежність показників хлорофілу *a* від умов опромінення

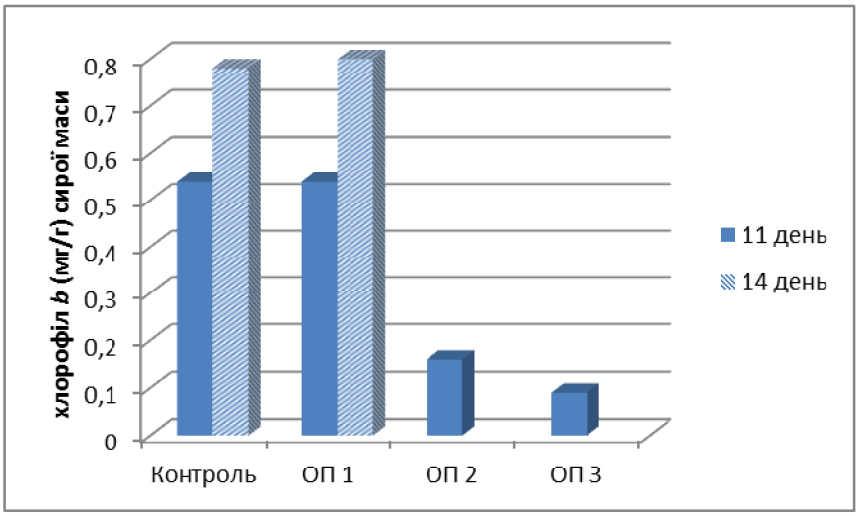


Рис. 8 - Залежність показників хлорофілу *b* від умов опромінення

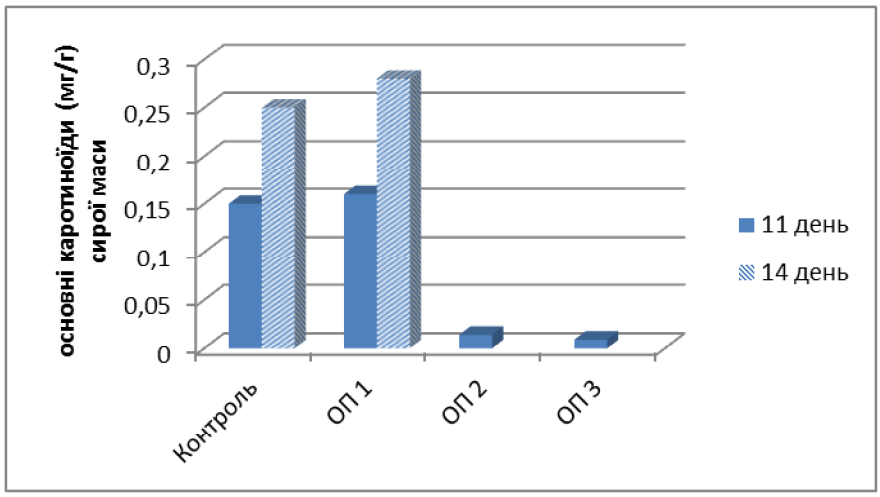


Рис. 9 - Залежність показників основних каротиноїдів від умов опромінення

На рис. 7-9 наведена залежність концентрації хлорофілу *a* і *b* та основних каротиноїдів від умов опромінення. На 11 день під дією ОП 3 бачимо зменшення концентрації хлорофілу *a* на 80 %, хлорофілу *b* – 83 %, основних каротиноїдів – 94 %, при ОП 1 спостерігаємо збільшення вмісту хлорофілу *a* на 11 %, основних каротиноїдів – 6 %, а під дією ОП 2 – зменшення концентрації хлорофілу *a* на 66 %, хлорофілу *b* – 70 %, основних каротиноїдів – 90 % відносно контрольного ОП. На 14 день при опроміненні ОП 1 бачимо збільшення концентрації хлорофілу *a* на 37 %, хлорофілу *b* – 2 %, основних каротиноїдів – 12% відповідно до контрольного ОП.

Чиста продуктивність фотосинтезу відображає збільшення загальної біомаси рослин за певний проміжок часу відносно показника середньої площі листків за цей самий період. В нашому випадку чиста продуктивність фотосинтезу рослин у фазі першого справжнього листка є на 30 % нижчою відносно контролю (табл. 3).

**Таблиця 3.**

**Чиста продуктивність фотосинтезу рослин сої культурної сорту Аннушка, г/м$^2$ за добу**

| Фаза росту і розвитку | Контроль | ОП 1 |
|---|---|---|
| 1-й справжній листок | 6,39 | 4,52 |
| *% до контролю* | - | *70,74* |

Отже, значний вплив на процеси росту і розвитку рослини та її пігментний склад здійснює рівень опромінення. Встановлено, що кращими морфометричними показниками володіють ті рослини, що росли при рівні опромінення 2,5-3 клк.

При опроміненні ОП 1 показано, що найбільший вплив спостерігається на суху і сиру біомасу рослини, площу листкової поверхні, також на вміст хлорофілу *a* та основних каротиноїдів, найменший – на вміст хлорофілу *b*.

При опроміненні ОП 2 та ОП 3 бачимо, що ОП 3 має більші показники сирої надземної маси та листків, незмінними залишились суха надземна маса та листки, зменшилась концентрація хлорофілу (*a* і *b*) та основних каротиноїдів відносно ОП 2 (рис. 2-5, 7-9).

При 16-ти годинному освітленні за 2 тижні ОП 1 затрачає 3,9 кВт*год електроенергії, ОП 2 – 4 кВт*год, ОП 3 – 0,8 кВт*год, а контрольний ОП – 8 кВт*год.

Хоча ОП 1 та контрольний ОП мали однаковий рівень опромінення, проте показники при дії ОП 1 на базі СД до 14 дня значно кращі. З цього випливає, що даний світловий прилад можна рекомендувати для опромінення рослин закритого ґрунту.

Експеримент не охоплював весь вегетаційний період, тому дані не є коректними після фази першого справжнього листка і залишаються умовно відкритим питанням щодо використання даних джерел світла в інші фази росту, що і є предметом наших наступних досліджень.

**Висновки:**

1. Більшість отриманих морфометричних, фізіологічних показників при опроміненні СД матрицею не суттєво відрізняються від показників рослин, що росли за умов опромінення КЛЛ.

2. ОП на основі СД білого кольору свічення, типу МТК2-4,8 з рівнем опромінення 2,5-3 клк рекомендується використовувати для світлокультури рослин, що дозволить зменшити споживання електроенергії в порівнянні з енергоощадними лампами на 50 %.

**Література:**

1. Протасова Н. Н. Светокультура как способ выявления потенциальной продуктивности растений / Н. Н. Протасова // Физиология растений. – 1987. – №4 – С.812-822.

2. Освітлення промислових об'єктів / П. П. Говоров [та ін.]. – Тернопіль: Джура, 2008. – 388с.

3. Г. Бизяк Спектры излучения и фотобиологическое действие светодиодов / Г. Бизяк, М. Кланичек-Гунде, М. Б. Кобав, К. Маловр-Ребек // Светотехника. – 2013. – №2 – с.20-24.

4. Грицаєнко З. М. Методи біологічних та агрохімічних досліджень рослин і ґрунту / З. М. Грицаєнко, А. О. Грицаєнко, В. П. Карпенко. – К. : ЗАТ «Нічлава», 2003. – 316, [4] с.)

5. Починок Х. Н. Методы биохимического анализа растений / Х. Н Починок. – К. : Наукова думка, 1976. – 333 с.

## ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ИСТОЧНИКИ СВЕТА ДЛЯ СВЕТОКУЛЬТУРЫ РАСТЕНИЙ

В. А. Андрийчук, М. И. Гнатович, А. И. Герц

*В работе представлены результаты исследований условий роста и развития растений закрытого грунта при облучении светодиодами и компактными люминесцентными лампами. Проведен анализ светотехнических и энергетических параметров облучательных устройств. Исходя из расчета энергорасходов облучательных устройств предложены энергосберегающие облучатели и приведены значения их энергетической эффективности.*

## ENERGY SAVING LIGHT SOURCES FOR LIGHTCULTURE

V. Andriychuk, M. Gnatovych, A. Hertz

*The researching results of the greenhouse plants growth irradiated with the light-emitting diodes and compact fluorescent lamps are presented in our work. The lighting and energy parameters were analyzed. The energy-efficient irradiators were suggested according to the calculations of the irradiated device energy consumption and their energy-efficient substantiations were given.*