

УДК 631.544

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ОПТИЧНОГО ОПРОМІНЮВАННЯ В  
БІОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ КУЛЬТИВАЦІЙНИХ СПОРУД  
РОСЛИННИЦТВА**

*Л. С. Червінський, доктор технічних наук, професор*

*Т. С. Книжка, кандидат технічних наук, асистент*

*О. І. Романенко, старший викладач*

*Я. М. Луцак, інженер*

*Національний університет біоресурсів і природокористування України*

*e-mail: lchervinsky@gmail.com*

**Анотація.** Розглянуто переваги роботи установок змінного опромінення порівняно з постійним, імпульсним і комбінованим способом. Опромінювальна установка формує світловий режим за допомогою рухомих опромінювачів і кута нахилу робочої поверхні опромінювача. Визначено просторовий і поверхневий розподіл оптичного випромінювання, що дозволяє знизити енергоємність процесу вирощування тепличних рослин, збільшити коефіцієнт рівномірності та ефективність опромінення, підвищити якість сільськогосподарської продукції.

**Ключові слова:** енергоефективність у біотехнічних системах, змінне опромінення, опромінюючі установки, продуктивність фотосинтезу, рослини в культивацийних спорудах

**Актуальність.** У технологічному процесі культивацийних споруд рослинництва оптичному випромінюванню немає альтернативи. Воно є найважливішим чинником фотосинтезу, що створює мікроклімат для активного росту і розвитку рослин. Позитивна дія оптичного випромінювання досягається завдяки проникаючій здатності випромінювання і його специфічній дії на клітинному і молекулярному рівні в біологічному об'єкті [1].

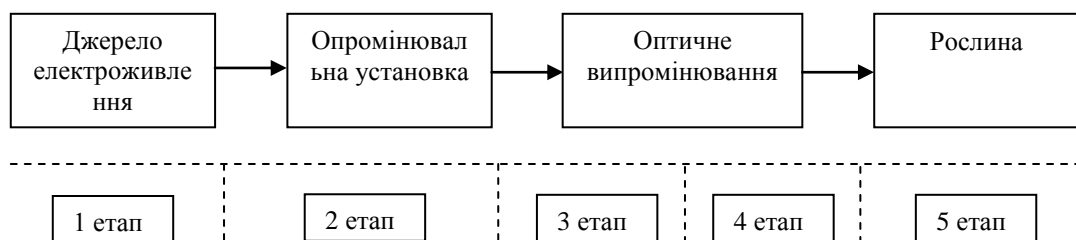
**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Теоретичні основи підвищення ефективності використання оптичного випромінювання були розглянуті В. А. Карповим, О. А. Косіциним. Вони запропонували

узагальнюючу математичну модель енергетики процесу штучного опромінення рослин, що дозволяє швидко оцінити ефективність та зміни в енергетиці даного процесу за двома головними параметрами – інтенсивністю опроміненості і періодом загальної тривалості опромінення [5, 6]

**Мета дослідження** – дослідити енергетику взаємного положення джерела випромінювання і опромінюваної технологічної поверхні та обґрунтувати параметри установки змінного опромінення для вирощування рослин у культивацийних спорудах.

**Матеріали і методи дослідження.** У процесі проведення дослідження використано методи фотометрії, математичного моделювання та системного аналізу.

**Результати дослідження та їх обговорення.** З урахуванням особливостей отримання оптичного випромінювання енергетику електротехнологічного процесу опромінення рослин, можна представити рядом перетворень енергії (рис. 1).



**Рис. 1** Схема перетворення енергії в біотехнічній системі

Згідно з рис.1 технічні засоби перетворення електричної енергії в оптичне випромінювання, оптичне випромінювання та сприймаюча його рослина утворюють біотехнічну систему.

Перетворення енергії можуть бути представлені послідовністю ряду етапів: 1 етап – подача електроенергії від джерела до джерела установки; 2 етап – генерування потоку оптичного випромінювання в джерелі випромінювання установки; 3 етап – формування потоку оптичного випромінювання в заданому

напрямку; 4 етап – формування поверхневого розподілу енергії потоку оптичного випромінювання на технологічній поверхні рослин; 5 етап – поглинання енергії оптичного випромінювання рослиною і перетворення її в інший вид енергії.

Таким чином, якщо розглядати електротехнологічний процес опромінення рослин з точки зору зменшення енергетичних втрат на етапах перетворення оптичного випромінювання, необхідно враховувати.

1. Раціональний вибір світлотехнічного обладнання, яке використовується в опромінювальній установці.

2. Раціональний просторовий розподіл оптичного випромінювання (застосування різних способів опромінення: змінний, імпульсний, комбінований тощо).

3. Раціональний розподіл оптичного випромінювання по опромінюваній поверхні (враховуючи особливості фітоценозу).

4. Використовувати як відгук системи реакцію рослини на фотобіологічну дію оптичного випромінювання.

На основі аналізу раніше проведених досліджень в цьому напрямку виявлено, що недостатньо розглянуто питання про ефективне взаємне положення джерела випромінювання і опромінюваної технологічної поверхні.

Тому в опромінювальній установці пропонується застосувати змінне опромінення, яке створюється рухомими джерелами випромінювання і похилу технологічну поверхню. Обидва ці фактори дають особливий просторовий та поверхневий розподіл енергії оптичного випромінювання. Переваги роботи установок змінного опромінення порівняно з постійним, імпульсним і комбінованими способами полягають у такому: змінне опромінення створює світлові умови, при яких світло використовується не тільки як фактор, необхідний для нормального проходження процесу фотосинтезу, а й як подразник, що включає механізми адаптації рослин до постійно мінливих

природніх зовнішніх умов [2]; підвищується рівномірність опромінення, створюється ефект об'ємного дифузного опромінення [3, 4]; змінне опромінення дає можливість комплексно використовувати природну радіацію, що надходить у теплицю; застосовуючи рухомі опромінювачі, можна скоротити число ламп, світлотехнічного обладнання і т.д., тим самим зменшити капітальні та енергетичні витрати на опромінення рослин, спростити обслуговування і підвищити надійність їх роботи, не зменшуючи термін служби. Згідно з методологічними доробками В. М. Карпова [5, 6], у загальному вигляді накопичена рослинами біомаса  $M$  у відносних одиницях може бути представлена

$$M = C E t \eta_p, \quad (1)$$

де  $C$  – коефіцієнт пропорційності;  $\eta_p$  – ККД фотосинтезу рослин;  $E$  – фотосинтезна опроміненість рослин, Вт/м<sup>2</sup>;  $t$  – час вегетаційного періоду росту рослини (кількість годин опромінення).

Біомаса рослини буде збільшуватися за рахунок створення ефективного світлового режиму опромінення, який збільшує ККД фотосинтезу рослин. У досліджуваній опромінювальній установці світловий режим створюється швидкісним режимом рухомих опромінювачів і зміною кута похилої робочої поверхні. Швидкісний режим джерел опромінювання формує змінне опромінення, яке характеризується такими параметрами: тривалість роботи джерел опромінення (сумарний час, за який рослина отримує штучне опромінення протягом всього вегетативного періоду); нормована експозиція (загальна кількість опромінення, яку повинні отримати рослини для нормального росту і розвитку); швидкість руху опромінювачів задає експозицію (дозу) опромінення і тривалість впливу на рослини.

У загальному випадку експозиція (доза) опромінення

$$H = E \cdot t. \quad (2)$$

Доза, отримана рослинами при русі опромінювачів за проміжок часу від максимального значення опромінення до наступного максимального значення, визначається

$$H_i = E_i \cdot t_i, \quad (3)$$

де  $t_i$  – часовий проміжок від максимального значення опромінення до наступного максимуму, с.

Часовий проміжок, протягом якого відбувається зміна високої інтенсивності опромінення, залежить від швидкості опромінювачів і довжини їх ходу над рослинами

$$h = v/t_i, \quad (4)$$

де  $h$  – довжина повного ходу опромінювача, м;  $v$  – швидкість опромінювача, м/с.

Отже, експозиція, створювана рухомими опромінювачами

$$H_i = E_i h/v. \quad (5)$$

Таким чином, чим більша швидкість руху опромінювачів за один хід, тим меншу кількість оптичної енергії отримують рослини. Слід зазначити, що процес фотосинтезу протікає як при безперервному, так і при змінному опроміненні. Але якщо подавати енергію оптичного випромінювання тільки під час світлової стадії фотосинтезу, то можна істотно знизити втрати оптичної енергії і, власне, витрати електроенергії [4].

Для визначення в загальному випадку освітленості на робочій поверхні необхідно обчислити значення спрямованої до освітлюваної поверхні сили світла, відстань від випромінювача до освітлюваної поверхні і кут падіння світла за виразом.

$$E = \frac{I_\alpha \cos \beta}{r^2} \quad (6)$$

де  $I_\alpha$  – сила світла (просторова щільність світлового потоку), кд;  $\beta$  – кут між нормаллю до елемента поверхні і напрямком сили світла;  $r$  – відстань від джерела до об'єкта, що опромінюється, м.

Таким чином, з (6) видно, що кількість освітленості на одиницю робочої площі залежить від взаємного положення джерела і робочої поверхні. З тієї ж формули видно, що кут  $\beta$  має важливу роль у розподілі світлового потоку по робочій поверхні.

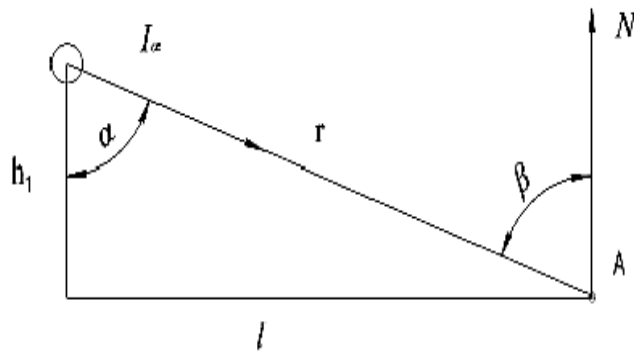


Рис. 2. Розрахунок опроміненості горизонтальної поверхні

Чим більший кут  $\beta$ , тим більший потік отримує точка  $A$ . Збільшимо кут  $\beta$  за рахунок зміни кута нахилу робочої поверхні (рис. 3)

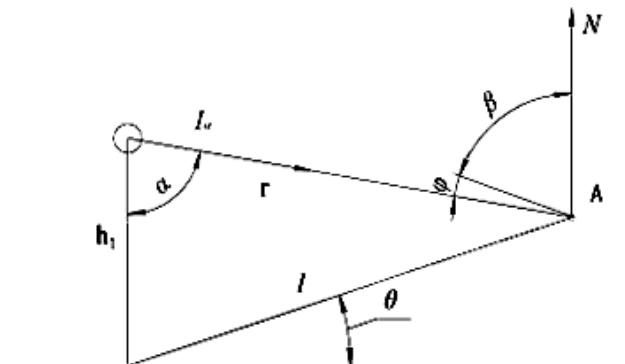


Рис. 3. Положення опромінювача щодо похилої поверхні

На рис. 3 видно, що відстань від опромінювача до точки  $A$  зменшилася, кут  $\beta$  збільшився на величину  $\varphi$ . Отже, освітленість в точці  $A$  підвищилася за рахунок кута нахилу робочої поверхні  $\Theta$

$$E = \frac{I_{\alpha} \cos \beta + \varphi}{r^2} \quad (7)$$

Аналізуючи вирази (6) і (7) розрахункове рівняння освітленості для похилої площини в точці  $A$  має вигляд

$$E_A = \frac{I_{\alpha} \cos^3 \alpha}{h^2 p} \left( \cos \Theta \pm \frac{P}{h} \sin \Theta \right) = E_{гориз} \left( \cos \Theta \pm \frac{P}{h} \sin \Theta \right), \quad (8)$$

де  $E_A$  і  $E_{гориз}$  – освітленість відповідно робочої поверхні в точці  $A$  і горизонтальної поверхні, лк;  $\alpha$  – кут між направленням сили світла до розрахункової точки  $A$  і віссю симетрії опромінювача, град;  $h$  – висота опромінювача над горизонтальною площиною, м;  $p$  – найкоротша відстань від проекції осі симетрії світильника на горизонтальну площину до похилої площини, м.

Якщо освітленість в точці  $A$  буде мінімальною  $E_A$ , а освітленість, розрахована на горизонтальній поверхні, буде максимальна  $E_{гориз}$ , то їх відношення дає коефіцієнт рівномірності освітлення

$$z = \frac{E_A}{E_{гориз}} = \left( \cos \Theta \pm \frac{P}{h} \sin \Theta \right) \geq 0,8 \dots 1 \quad (9)$$

Звідси випливає, що коефіцієнт рівномірності похилої поверхні є функцією залежності  $z = f(\Theta, h, p)$  від кута на похилій поверхні, від висоти підвісу опромінювача і від відстані опромінювача до похилої поверхні.

Розглянемо шляхи підвищення ефективності використання світлового потоку через питому продуктивність рослин [6]

$$A = \frac{M}{W}, \quad (10)$$

де  $M$  – біомаса продукції, г;  $W$  – електрична енергія, споживана за вегетаційний період опромінюючою установкою, Вт год.

Звідси випливає

$$Q = P_y t_v = \frac{E_{\min} S}{z \eta_o \eta_\phi \eta_B}, \quad (11)$$

де  $P_y$  – потужність опромінювальної установки, Вт;  $E_{\min}$  – мінімальна фотосинтезна опроміненість, фіт/м<sup>2</sup>;  $\eta_o$  – ККД випромінювача, відн. од.;  $\eta_\phi$  – фітоотдача опромінювача, фіт/Вт;  $\eta_B$  – коефіцієнт використання потоку в області ФАВ (фотоактивного випромінювання).

Враховуючи (10),

$$A = \frac{Mz \eta_o \eta_\phi \eta_B}{SE_{\min} t_v} = \eta_o \eta_\phi \eta_B \frac{Mz}{SH}. \quad (12)$$

Враховуючи (5) і (9), питома продуктивність рослин

$$A = M \frac{\eta_o \eta_\phi \eta_B v \left( \cos \Theta \pm \frac{P}{h} \sin \Theta \right)}{E_{\min} Sh}. \quad (13)$$

Очевидно, що при порівнянні різних варіантів установок опромінення і технологій вирощування рослин при штучному опроміненні кращим буде той з них, для якого питома продуктивність рослин (показник  $A$ ) буде більше. Іншими словами, необхідно забезпечувати такі умови для вирощування рослин, при яких  $A \rightarrow \max$ .

З аналізу (13) можна сказати таке:

1. Відношення групи величин, що характеризують параметри опромінювальної установки –  $\frac{\eta_o \eta_\phi \eta_B}{E_{\min}} v$ . У неї входить характеристика застосовуваного в установці джерела випромінювання і швидкісний режим опромінювача, що створює змінний спосіб опромінення.



2. Відношення групи величин, які характеризують параметри просторового положення технологічної поверхні –  $\left( \frac{\cos\Theta \pm \frac{P}{h} \sin\Theta}{Sh} \right)$ . У неї входять параметри установки, а саме довжина ходу опромінювача, площа технологічної поверхні і кут похилої поверхні.

3. Реакція рослини на створені світлові умови за допомогою опромінювальної установки –  $M$  (збільшення біомаси рослини, як показник продуктивності фотосинтезу рослин в даних світлових умовах).

**Висновки і перспективи.** Питома продуктивність рослин залежить від збільшення біомаси рослини. Для цього необхідно створити рівномірність опромінення робочої поверхні за рахунок регулювання кута похилої поверхні. Один опромінювач розрахований на опромінення певної площі, якщо збільшувати площу, то продуктивність зменшується. Змінна опромінення, що створюється рухомими опромінювачами, збільшує питому продуктивність рослин, але стримуючим фактором є шлях одного ходу опромінювача.

Таким чином, необхідно оптимізувати параметри опромінювальної установки, а саме швидкість руху опромінювачів і кут похилої поверхні. Критерієм оптимізації є маса сухої речовини рослини як показник ефективності застосування даного технічного рішення.

### Список літератури

1. Карпов В. Н. Энергосбережение в оптических электротехнологиях АПК. Прикладная теория и частные методики / В. Н. Карпов, С. А. Ракутько. – СПб. : СПбГАУ, 2009. – 100 с.

2. Червінський Л. С. Особливості застосування світлодіодних джерел світла в світлотехнічних установках / Л. С. Червінський, Я. М. Луцак // Науково-технічний журнал «Енергетика та компютерно-інтегровані технології в АПК». – Харків: ХНТУСГ, 2015 – №1 (3). – С. 43–45.

3. Червинский Л. С. Обоснование влияния спектрального состава источников световой энергии на жизнедеятельность растений в сооружениях закрытого грунта / Л. С. Червинский, Я. Н. Луцак // Теоретический и научно-практический журнал Всероссийского научно-исследовательского института

электрификации сельского хозяйства «Инновации в сельском хозяйстве». – Москва: ВИЭСХ, 2016. – Вып. №4 (9). – С. 180–187.

4. Червінський Л. С. Метод визначення просторової фотосинтезної опроміненості / Л. С. Червінський, С. М. Усенко, Т. С. Книжка, Я. М. Луцак // Технічна електродинаміка, Інст. Електродинаміки НАН України, – 2016 – № 5 – С. 88–90.

5. Косицын О. А. Математическая модель энергетики искусственного облучения растений / О. А. Косицын // Механизация и электрификация сел. хоз-ва. – 2004. – № 5. – С. 20–21.

6. Косицын О. А. Учет температуры воздуха при моделировании искусственного облучения растений / О. А. Косицын // Механизация и электрификация сел. хоз-ва. – 2005. – № 5. – С. 20–21.

### **References**

1. Karpov, V. N., Rakut'ko, S. A. (2009) Energoberezhniye v opticheskikh elektrotekhnologiyakh APK. Prikladnaya teoriya i chastnyye metodiki [Energy saving in optical electrotechnologies of agroindustrial complex. Applied theory and private techniques]. SPb. : SPbGAU., 100.

2. Chervinskyi, L.S., Lutsak, Ia.M. (2015). Osoblyvosti zastosuvannya svitlodiodnykh dzherel svitla v svitlotekhnichnykh ustanovkakh [Features of LED light sources in lighting installations] Naukovo-tekhnichnyi zhurnal «Enerhetyka ta kompiuterno-intehrovani tekhnolohii v APK». Kharkiv: KhNTUSH, 1 (3), 43–45.

3. Chervinskyi, L.S., Lutsak, Ia.M. (2016). Obosnovaniye vliyaniya spektral'nogo sostava istochnikov svetovoy energii na zhiznedeyatel'nost' rasteniy v sooruzheniyakh zakrytogo grunta. [Justification of influence of the spectral composition of light energy sources in the plant life in the greenhouse plants]. Teoreticheskyy i nauchno-prakticheskyy zhurnal Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta elektrifikatsii sel'skogo khozyaystva «Innovatsii v sel'skom khozyaystve». Moskva: VIESKH, 4 (9), 180–187.

4. Chervinskyi, L.S., Usenko, S.M., Knyzhka, T.S., Lutsak, Ia.M. (2016). Metod vyznachennia prostorovoi fotosyntezy oprominenosti. [The method of determining the spatial photosynthesis exposure]. Tekhnichna elektrodynamika, Inst. Elektrodynamiky NAN Ukrainy, 5, 88–90.

5. Kositsyn, O. A. (2004). Matematicheskaya model' energetiki iskusstvennogo oblucheniya rasteniy. [Mathematical model of the energy of artificial plant irradiation]. Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel. khoz-va., 5, 20–21.

6. Kositsyn, O. A. (2005). Uchet temperatury vozdukhа pri modelirovanii iskusstvennogo oblucheniya rasteniy. [Air temperature in simulation of artificial plant irradiation]. Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel. khoz-va. 5, 20–21.

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОПТИЧЕСКОГО ОБЛУЧЕНИЯ В  
БИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ КУЛЬТИВАЦИОННЫХ  
СООРУЖЕНИЙ РАСТЕНИЕВОДСТВА**

*Л. С. Червинский, Т. С. Книжка, А. И. Романенко, Я. Н. Луцак*

**Аннотация.** Рассмотрены преимущества работы установок переменного облучения по сравнению с постоянным, импульсным и комбинированным способом. Облучательная установка формирует световой режим с помощью подвижных облучателей и угла наклона рабочей поверхности облучателя. Определены пространственное и поверхностное распределение оптического излучения, что позволяет снизить энергоемкость процесса выращивания тепличных растений, увеличить коэффициент равномерности и эффективность облучения, повысить качество сельскохозяйственной продукции.

**Ключевые слова:** энергоэффективность в биотехнических системах, переменное облучение, облучающие установки, продуктивность фотосинтеза, растения в культивационных сооружениях

**INCREASE OF EFFICIENCY OF OPTICAL IRRADIATION IN  
BIOTECHNICAL SYSTEMS OF CULTIVATION PLANTS OF CROP  
PRODUCTION**

*L. Chervinsky, T. Knizhka, A. Romanenko, J. Lutsak*

**Abstract.** The advantages of the operation of variable irradiation units in comparison with permanent, pulse and combined methods are considered in the article. The irradiation unit generates a light mode by means of movable irradiators and the angle of inclination of the working surface of the irradiator. The spatial and surface distribution of optical radiation is determined, which makes it possible to reduce the energy intensity of the process of growing greenhouse plants, increase the uniformity factor and the effectiveness of irradiation, and improve the quality of agricultural products.

**Key words:** energy efficiency in biotechnical systems, variable irradiation, irradiation facilities, productivity of photosynthesis, plants in cultivation facilities