

УДК.628.979;621.384.

**В. Андрійчук, канд. фіз.-мат. наук**

*Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя*

## **ОДНОЧАСНЕ ВИКОРИСТАННЯ РІЗНОСПЕКТРАЛЬНИХ ЛАМП В ОПРОМІНЮВАЛЬНИХ ПРИСТРОЯХ ДЛЯ СВІТЛОКУЛЬТУРИ РОСЛИН**

*Для розширення спектру випромінювання опромінювальних пристроїв для світлокультури рослин запропоновано одночасне використання декількох різноспектральних джерел. Подано методику розрахунку енергетичної та фотосинтезної ефективності багатолампового опромінювача. Вироблено його алгоритм та програмне забезпечення на ЕОМ. Подано приклади розрахунку різних комбінацій розрядних джерел випромінювання.*

Умовні позначення

ДВ	– джерело випромінювання;
НЛВТ	– натрієва лампа високого тиску;
ОП	– опромінювальний пристрій
ОУ	– опромінювальна установка
ФАР	– фотосинтезно активна радіація;
$\Phi_{ij}$	– потік випромінювання в і-ому спектральному діапазоні j-ого джерела;
$\Delta E_j$	– опромінення площадки $\Delta S$ від j-ого джерела;
$\gamma$	– кут між нормаллю до площадки $\Delta S$ і віссю тілесного кута $\Delta\Omega$ ;
$\eta_{\Phi}, \eta_i$	– коефіцієнти корисної дії ДВ (в області ФАР і в і-ому спектральному діапазоні).

Поряд з енергетичною дією фотосинтезно активна радіація (ФАР) впливає на життєдіяльність рослин через реакції, що безпосередньо не залежать від фотосинтезу, але визначають як продуктивність, так і харчову якість рослинної продукції, спричиняючи такі процеси, як фототропізм, фотоморфогенз, фотоперіодизм. Вони мають власні характерні спектри дій і рівні опромінення [1-3]. У більш широкому спектральному діапазоні можна виділити такі умовні ділянки відповідно до їх впливу на фізіологічні процеси:

- понад 1000 нм - тільки тепловий вплив;
- 1000÷700 нм - ефект витягнення стебла;
- 700÷610 нм - зона максимального фотосинтетичного ефекту, синтезу хлорофілу, ефекту фотоперіодизму;
- 510÷400 нм - другий пік фотосинтезу, ростовий і формативний ефекти;
- 400÷315 нм - фотосинтез, ростовий і формативний ефекти;
- 315÷280 нм - випромінювання шкідливе для більшості рослин;
- до 280 нм - рослини швидко гинуть.

Як показано у [4], найбільшою фотосинтезно ефективною володіють натрієві та металогалогенні розрядні лампи. Натрієві лампи високого тиску (НЛВТ) є найбільш ефективною групою розрядних джерел випромінювання, які на сьогодні володіють світловою віддачею 160 лм/Вт при потужності 30-1000 Вт з терміном експлуатації понад 25000 годин [5]. Єдиним і дуже важливим недоліком даних ламп є те, що випромінювання їх зосереджене у жовто-оранжевій області спектру. Незважаючи на їх високу фотосинтезну ефективність, відсутність випромінювання у синьо-зеленій області призводить до однобокого впливу світла цих ламп на ріст і розвиток рослин [3].

Одним із способів розширення спектру випромінювання натрієвих ламп є зміна їх конструкції та складу наповнення розрядної трубки, але при цьому погіршуються інші важливі параметри. В першу чергу, знижується світлова віддача і термін експлуатації. Переваги і недоліки окремих способів розширення спектрального складу випромінювання або підвищення коефіцієнта кольоропередачі розглядається в [7,9]. Нетрадиційним підходом до зміни спектрального складу випромінювання, є одночасне використання в одній опромінювальній установці (ОУ) різних типів ДВ [6]. Такий метод дозволяє максимально використати переваги одних джерел, нівелюючи недоліки за рахунок інших [8].

При підборі ДВ різного типу в ОУ треба враховувати те, що: а) потужності ламп ( $P_n$ ) можуть бути як однаковими, так і помітно відрізнятись; б) можна використовувати ті самі ПРА для ламп високої інтенсивності різних типів; в) ДВ з різними світлотехнічними характеристиками можна по-різному розташовувати в ОУ, змінюючи висоту підвішування, напрям потоку випромінювання та ін. Розрахунок основних параметрів такої комбінованої світлотехнічної установки виконано в [6,7], де за змінну величину взято відношення світлових потоків ламп.

Для спрощення порівняльної оцінки ефективності різних ДВ обмежимося областю ФАР і розіб'ємо їх складний спектр на три квазімонохроматичні випромінювання, які відповідають трьом спектральним ділянкам:  $\Delta\lambda_1=380-500$  нм,  $\Delta\lambda_2=500-600$  нм,  $\Delta\lambda_3=600-720$  нм [11]. Відносний спектральний розподіл випромінювання оцінюватимемо відношенням середніх енергій випромінювання у

вибраних ділянок спектру до енергії випромінювання ФАР ( $\bar{S}_i = \Phi_i / \Phi_e$ ). Запишемо вирази для складових потоків:

$$\Phi_V = \Phi_e \cdot \sum_{i=1}^3 \bar{S}_i \cdot V(\lambda_i) = \Phi_e [\bar{S}_1 \cdot V(\lambda_1) + \bar{S}_2 \cdot V(\lambda_2) + \bar{S}_3 \cdot V(\lambda_3)]$$

$$\Phi_e = \Phi_e \cdot \sum_{i=1}^3 \bar{S}_i = \Phi_e \cdot (\bar{S}_1 + \bar{S}_2 + \bar{S}_3)$$

$$\Phi_\phi = \Phi_e \cdot \sum_{i=1}^3 \bar{S}_i \cdot K_\phi(\lambda_i) = \Phi_e [\bar{S}_1 \cdot K_\phi(\lambda_1) + \bar{S}_2 \cdot K_\phi(\lambda_2) + \bar{S}_3 \cdot K_\phi(\lambda_3)],$$

де  $\Phi_V$  — світловий потік;  $\Phi_e$  — потік ФАР;  $\Phi_\phi$  — фотосинтезний потік;  $V(\lambda_i)$  — відносна спектральна чутливість середнього ока, причому  $V(\lambda_1)=0,020$ ,  $V(\lambda_2)=1,000$ ,  $V(\lambda_3)=0,015$ ;  $K_\phi(\lambda_i)$  — функція спектральної фотосинтезної ефективності випромінювання, що згідно з [11] дорівнює  $K_\phi(\lambda_1)=0,6$ ,  $K_\phi(\lambda_2)=0,4$ ,  $K_\phi(\lambda_3)=1,0$ ;  $\lambda_i$  — умовні характерні довжини хвиль, важливі для основних процесів у рослинах —  $\lambda_1=435$  нм,  $\lambda_2=555$  нм,  $\lambda_3=675$  нм [11,12].

Таблиця 1[4,12]

Параметри фотобіологічної цінності джерел випромінювання

Тип джерела випромінювання	$\bar{S}_1$ , %	$\bar{S}_2$ , %	$\bar{S}_3$ , %	Світловий потік $\Phi_v$ , клм	Повний потік $\Phi_e$ , Вт	Фотосинтезний потік $\Phi_{\phi e}$ , Вт	$\eta_e$ , %	$\eta_\phi$ , %
ДРІФ400, Hg	19	48	33	16	48	31	12	8
ДРВ750, W, Hg	18	44	38	18	59	37	8	5
ЛОР1000, Li, In	43	14	43	24	220	160	22	16
ДРФ1000, Na, Tl, In	30	55	15	60	160	82	16	8
ДРФ1000, Na, Sc	33	50	17	72	205	110	20	11
ДНаТ400, Na	9	64	27	45	101	56	25	14
ДРИ400-5, Na, Sc	33	50	17	36	103	56	25	14
ДРИ1000-5, Na, Sc	33	50	17	103	296	160	29	16
ДРИ2000-6, Na, Sc	33	50	17	200	575	311	29	16
М4-6000, Na, Sc	33	50	17	540	1550	840	26	14
ДРТИ1000-1, In	100	-	-	2	150	83	15	8
ДРТИ1000-2, Tl	-	100	-	95	140	53	14	5
ДРИ400, Li, Sc	29	38	33	24	90	59	22	15
ДРОТ12000, Sn	42	33	25	120	513	289	25	14
ДРИ2000-1, Dy, Ho	34	33	33	170	720	457	36	23
ДКсТ В6000, Хе	37	35	28	220	890	570	15	9
КГ220-2000-4, W, Br	20	30	50	44	207	165	10	8
ЛФ40-2, Hg	30	35	35	1,6	675	4	16	10
ЛФ150, Hg	20	17	63	5	40	30	27	20

Результати експериментальних досліджень і розрахунку енергетичних ( $\eta_e$ ) і фотосинтезних ( $\eta_\phi$ ) ККД основних різноспектральних ДВ, що використовуються у світлокультурі рослин, подані в таблиці 1.

Розрахуємо ефективність фотобіологічної дії комбінації різних джерел випромінювання. Для вироблення методики такого розрахунку врахуємо, що світлове поле, створене декількома джерелами випромінювання, дорівнює сумі світлових полів від кожного джерела зокрема, це закон адитивності світлових полів. Видиму область спектру випромінювання кожного з ДВ розіб'ємо на три інтервали згідно з

ОСТ 46 140-83:  $\Delta\lambda_1=380+500$  нм,  $\Delta\lambda_2=500+600$  нм,  $\Delta\lambda_3=600+720$  нм. Дані про величину потоку випромінювання у кожному з цих інтервалів подано у таблиці 1. Повний потік випромінювання видимої частини спектру, або потік ФАР, можна записати як суму складових потоків

$$\Phi_j = \sum_{i=1}^3 \Phi_{ij}, \quad (1)$$

де  $\Phi_{ij}$  - потік випромінювання в  $i$ -тій ділянці спектру  $j$ -ого джерела.

Для аналізу світлового поля обмежимося розподілом густини потоку випромінювання на опромінювальній площині. До таких випадків належать всі опромінювальні установки для опромінення плоских поверхонь.

Запишемо опромінення елементарної площадки  $\Delta S$  від  $j$ -го джерела

$$\Delta E_j = \frac{\Delta\Phi_j}{\Delta S} \cdot \cos\gamma, \quad (2)$$

де  $\Delta\Phi_j$  - потік випромінювання в елементарному тілесному куті  $\Delta\Omega$ ,  $\gamma$  - кут між нормаллю до площадки  $\Delta S$  і віссю тілесного кута  $\Delta\Omega$ .

Запишемо  $\Delta\Phi_j$  згідно (1) як суму складових потоків випромінювання

$$\Delta\Phi_j = \sum_{i=1}^3 \Delta\Phi_{ij}. \quad (3)$$

Тоді (2) можна подати як

$$\Delta E_j = \frac{\sum_{i=1}^3 \Delta\Phi_{ij}}{\Delta S} \cdot \cos\gamma. \quad (4)$$

Якщо ОП складається з  $n$  джерел випромінювання різного типу, то сумарна середня опроміненість площадки  $\Delta S$  дорівнюватиме

$$\Delta E = \frac{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^3 \Delta\Phi_{ij}}{\Delta S} \cdot \cos\gamma. \quad (5)$$

Для оцінки енергетичної ефективності ОП з ДВ різного типу можна використати відношення сумарного потоку ФАР до сумарної потужності ДВ

$$\eta_e = \frac{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^3 \Delta\Phi_{ij}}{\sum_{j=1}^n P_j}. \quad (6)$$

Для дослідження впливу однорідного випромінювання в окремих спектральних областях на ріст рослин енергетичну ефективність ОУ можна визначити з даної складової потоку за формулою

$$\eta_i = \frac{\sum_{j=1}^n \Delta\Phi_{ij}}{\sum_{j=1}^n P_j}. \quad (7)$$

При підборі різноспектральних ДВ врахуємо, що широкосмуговий спектр випромінювання ОП близький до рівноенергетичного 33% — 33% — 34%, або (20-25)% — (20-25)% — (60-50)% у вказаних спектральних ділянках ФАР. Енергетичний ККД ( $\eta_e$ ) в області ФАР не менший за 25%.

Для прикладу розглянемо випадок коли до ОП належить лампа типу ДНаТ-400, і її необхідно доповнити ще одним джерелом, щоб досягти як високої енергетичної

ефективності, так і рівномірнішого розподілу випромінювання по спектру.

Фотосинтезну ефективність опромінювача з декількома лампами різного типу розраховуватимемо в такій послідовності.

1. Задаємо необхідне значення опромінювання ФАР у Вт/м<sup>2</sup>.
2. Використовуючи зональний метод, ділимо область ФАР на 3 ділянки -  $\Delta\lambda_1=380\div500$  нм,  $\Delta\lambda_2=500\div600$  нм,  $\Delta\lambda_3=600\div720$  нм, у межах яких параметри росту і розвитку рослин та інтенсивність фотосинтезу залишаються постійними.

Таблиця 2.

Основні параметри опромінювачів з різним типом ламп

Типи ламп	Сумарний потік випромінювання ФАР $\Phi_e$ , Вт	Розподіл потоку випромінювання на ділянках спектру			Енергетична ефективність ОП, $\eta_e = \frac{\Phi}{P}$ , %	Сумарний фотосинтезний потік $\Phi_{\phi}$ , фіт	Фотосинтезна ефективність ОП $\eta_{\phi} = \frac{\Phi_{\phi c}}{\Phi}$ , %
		$K_1$ , %	$K_2$ , %	$K_3$ , %			
ДНаТ-400 ЛОР-1000	321	32	30	38	23	216	67
ДНаТ-400 ДРИ-400-5	204	21	57	22	26	112	54
ДНаТ-400 ДРИ-1000-5	397	27	53	20	28	216	54
ДНаТ-400 ДРИ-2000-6	676	29	52	19	28	366	54
ДНаТ-400 ДРФ-1000	306	25	55	20	22	166	54
ДНаТ-400 ДРВ-750	160	12	57	31	14	93	58
ДНаТ-400 ДРЛФ-400	149	12	59	29	17	87	58
ДНаТ-400 ДРОТІ-2000	614	37	38	25	26	345	56
ДНаТ-400 КГ-220-1000	203	14	47	39	15	106	52

3. Сумарний потік випромінювання записуємо як суму відповідних складових

$$\Phi = \Delta\Phi_1 + \Delta\Phi_2 + \Delta\Phi_3.$$

Його розподіл на спектрі вказують коефіцієнти:

$$K_1 = \frac{\Delta\Phi_1}{\Phi}; K_2 = \frac{\Delta\Phi_2}{\Phi}; K_3 = \frac{\Delta\Phi_3}{\Phi}.$$

4. Енергетичну ефективність ОУ з ДВ різного типу в області ФАР визначаємо за формулою (6). Аналогічно, при необхідності визначаємо ефективність ОУ з окремих складових потоку випромінювання згідно з (7).

Розрахунок виконувався за виробленою програмою, описаною у [4].

Основні параметри опромінювача з різними типами джерел випромінювання подані в таблиці 2. Із табличних даних випливає, що найвищою енергетичною ефективністю  $\eta_e=23\dots28\%$  володіють опромінювачі з комбінацією металогалогенна + натрієва лампи. Найбільш сприятливим спектром випромінювання володіє опромінювач з лампами ДНаТ-400 і ЛОР-1000. Одночасне використання в ОП ламп

ДНаТ-400 та ДРИ-400-5, ДРИ-1000-5, ДРИ-2000-6 переважає випромінювання другої спектральної області  $K_2=0,52\dots 0,57$ , тоді як у червоній області енергії випромінювання замало  $K_3=0,20\dots 0,28$ .

Комбінація ртутних розрядних ламп типу ДРЛФ-400 або кварцевих галогенних ламп розжарення КГ-220-1000 з лампами ДНаТ-400 має малу енергетичну ефективність  $\eta_e=15\dots 17\%$  з переважним випромінюванням в області 500-600 нм ( $K_2=0,47\dots 0,59$ ).

#### Висновки

1. Подана методика оцінки спектрального розподілу, енергетичної та фотосинтезної ефективності одночасного використання в ОП різноспектральних джерел випромінювання.

2. Розглянуто алгоритм розрахунку параметрів ОП з різною комбінацією ДВ. Вироблено програмне забезпечення даного розрахунку на ЕОМ.

3. Подано результати розрахунку параметрів ОП з різноспектральними ДВ, однією з яких є НЛВТ ДНаТ – 400. Показано, що найвищою енергетичною ефективністю випромінювання з найбільш сприятливим спектральним розподілом володіють комбінації металогалогенних та натрієвих ламп різної потужності.

*To extend the spectrum of the light culture plants irradiators the simultaneous application of some variable spectrum sources is suggested. The method of calculation of the power and photosynthesis effectiveness of the power and photosynthesis effectiveness of the multilamp irradiator is presented. The algorithm and software for this calculation is developed. The examples of different combinations calculation of the discharge sources irradiation are presented.*

#### Література

1. Charles G., Rossignol M. Environmental Effect on Plants in vitro. J. Plant Physiol. 1992. V 139. № 6. P.708-713.
2. Фотоиндуцированное движение хлоропластов. /Под ред. Поудина Ю.И. //: Применение оптического излучения в сельском хозяйстве. - Саранск, 1985. С.94-101
3. Сарычев Г.С. Облучательные светотехнические установки. -М.: Энергоатомиздат, 1992.-240с.
4. Андрийчук В.А., Дворницький В.М., Костик Л.М. Автоматизований метод визначення фотосинтезного потоку та коефіцієнта корисної дії джерела випромінювання // Вісник Тернопільського приладобудівного інституту. - 1996. - № 2. - С.116-121.
5. Энергосбережение в освещении / Под ред. Ю.Б. Айзенберга. - М.: Знак, 1999. - 264с.
6. Волкова С.В., Литвинов В.С., Петренко Н.П. О совместном использовании излучения натриевых и металлогалогенных ламп // Светотехника. - 1990. - № 9. - С.1-3.
7. Литвинов В.С., Петренко Н.П. О развитии натриевых ламп // Светотехника. - 1993. - № 4. - С.1-4.
8. Литвинов В.С., Петренко Р.П. О замене ламп типа ДРЛ натриевыми в действующих осветительных установках // Светотехника. - 1991. - № 5. - С.5-7.
9. Piper H.A. Color properties of dual-source lighting systems-predominantly HPS // Light. Res. and Appl. 1982. Vol.12. № 9. P.36-41.
10. Рохлин Г.Н. Разрядные источники света. - М.: Энергоатомиздат, 1991. - 720с.
11. ОСТ 46 140-83 Излучение оптическое. Оценка фотосинтезной эффективности. Термины и определения.
12. Вассерман А.Л., Квашин Г.Н., Малышев В.В. Об оценке эффективности действия источников излучения на растения // Светотехника. - 1986. - №7. - С 14-16.

Одержано 21.04.01 р.