

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

УДК 681.536.5:631.445.5

ПОГОДЖЕНО

Директор Інституту енергетики,
автоматики і енергозбереження
(назва Інституту)

В.В. Каплун
(ПІБ)
(підпис)

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

Завідувач кафедри автоматики
та робототехнічних систем
ім. акад. Г.П. Мартиненка
(назва кафедри)

В.П. Лисенко
(ПІБ)
(підпис)

«__» _____ 2022 р.

«__» _____ 2022 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

02.06.-КМР.2067"С".2021.12-08.016.ПЗ

на тему «ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ВДОСКОНАЛЕННЯ
КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ
ПІДТРИМКИ СВІТЛОВОГО РЕЖИМУ В ТЕПЛИЦІ НА БАЗІ
ВИКОРИСТАННЯ КОМПЛЕКСУ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ОВЕН»

Спеціальність: 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»
(цифр і назва)

Магістерська програма: Комп'ютерно-інтегровані системи управління
технологічними процесами у галузях АПК
(назва)

Гарант освітньої програми

Виконав

Керівник магістерської роботи

В.П. Лисенко, д.т.н., професор
(П.І.Б., науковий ступінь та вчене звання)

В.Ю. Соколов
(П.І.Б. студента)

Л.Є. Никифорова, д.т.н., професор
(П.І.Б., науковий ступінь та вчене звання)

КИЇВ-2022

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ІННІ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ, ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

автоматики та робототехнічних
систем ім. акад. І.І. Мартиненка

В.П. Лисенко

2022 р.

ЗАВДАННЯ

ДО ВИКОНАННЯ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ МАГІСТЕРСЬКОЇ РОБОТИ СТУДЕНТУ
(бакалаврської, дипломної)

Соколову Володимирі Юрійовичу

(прізвище, ім'я, по-батькові)

Спеціальність: 151 – «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Магістерська програма: Комп'ютерно-інтегровані системи управління технологічними процесами у галузях АПК

Тема магістерської роботи **«ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ВДОСКОНАЛЕННЯ КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПІДТРИМКИ СВІТЛОВОГО РЕЖИМУ В ТЕПЛИЦІ НА БАЗІ ВИКОРИСТАННЯ КОМПЛЕКСУ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ОБОВ»**,

затверджена наказом ректора НУБІП України від 08.12.2021 року №2067 «С»

Термін подання студентом магістерської роботи 28.10.2022 року

Вихідні дані до магістерської роботи: завдання кафедри на виконання магістерської роботи; нормативні документи по проектуванню об'єктів автоматизації; матеріали дослідження та аналізу; наукова література з тематики магістерської роботи.

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. .
2. .
3. .
4. .
5. .
6. .
7. .

Дата видачі завдання «10» грудня 2021 року

Керівник магістерської роботи _____

(Підпис)

Никифорова Л.Є.

(Прізвище та ініціали)

Завдання прийняє до виконання _____

(Підпис)

Соколов В.Ю.

(Прізвище та ініціали)

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ

НУБІП України

ІЧ – інфрачервоний

ККД – коефіцієнт корисної дії

НУБІП України

ЛЛ – люмінесцентна лампа

ЛР – лампа розжарювання

МГЛ – металогалогенна рослинницька лампа

ОВ – оптичне випромінювання

НУБІП України

ПРА – пуско-регулююча апаратура

УФ – ультрафіолетовий

ФАР – фотосинтетична активна радіація

LED – light-emitting diode, світлодіод

RGB – Red, Green, Blue – червоний, зелений, синій – адитивна колірна модель, що описує спосіб синтезу кольору

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

ВСТУП

НУБІП України

Актуальність теми. Рослини відіграють величезну роль у житті на

Землі. Вони самі виробляють органічні речовини у результаті фотосинтезу, а не отримують їх із зовнішнього середовища. Для зростання, цвітіння та плодоношення їм необхідне світло.

Як для фотосинтезу, так і взагалі для нормального протікання будь-яких фотобіологічних процесів життєдіяльності рослин необхідне світло – промениста енергія не тільки певного спектрального складу, але й відповідної потужності.

Основним джерелом штучного освітлення в наш час є електрична енергія. Першими у дослідках зі штучного опромінення у виробничих теплицях були лампи розжарювання. Наступним етапом стало використання газорозрядних ламп, що призвело до вирощування рослин не тільки у виробничих теплицях і лабораторіях, але і у тепличних господарствах. У наш час більшість тепличних господарств використовують для освітлення рослин натрієві лампи низького і високого тиску, а також металогалогенні лампи ДРИ. При цьому споживана потужність на 1м² площі теплиць досягає 125 Вт електричної енергії. Рівномірна освітленість рослин у теплиці досягається за допомогою світильників відповідної потужності із пуско-регулюючою апаратурою.

Продуктивність системи електричного доосвічування визначається спектральним складом джерела світла, рівнем освітленості та ККД, який впливає на експлуатаційні витрати. Для здійснення фотосинтезу необхідні випромінювання у визначеній частині оптичного випромінювання, яке бачить людське око, тобто так званій області фотосинтетичної активної радіації (ФАР). Характер дії фотосинтезу змінюється для випромінювань різного спектрального складу. У першу чергу слід зазначити, що в усіх зелених

рослин основні максимуми поглинання знаходяться у синій та червоній областях спектру, а мінімум – у жовто-зеленій.

На певних стадіях росту і розвитку рослин необхідні різні ділянки оптичного випромінювання в області ФАР у діапазоні 400-700 нм, але із переважанням червоних, синіх та фіолетових променів. На стадії цвітіння можуть виявитися продуктивними додавання жовтого та помаранчевого світла. У період плодоношення та дозрівання для деяких видів рослин зростає роль, наприклад, зеленого світла (огірки, томати). Відсутність у випромінюванні ламп окремих ділянок спектру може призвести до порушень нормального зростання рослин при їх тривалому вирощуванні.

Спектр натрієвих, металогалогенних та інших ламп, що широко використовуються у тепличному виробництві, лише частково замінюють спектр, необхідний для зростання і розвитку рослин.

Поява і розвиток світлодіодів у оптоелектронній промисловості, постійне підвищення їх світлової віддачі при малому енергоспоживанні дозволяють припустити, що найближчі роки світлодіоди можуть стати одним із основних джерел опромінення у захищеному ґрунті. Світлодіодні лампи дозволяють плавно регулювати рівень освітленості, мають покращену кольорову передачу і великий строк служби. Численними науковими дослідженнями доведено, що для освітлення рослин можна використовувати джерела світла на основі світлодіодів різного кольору світіння.

Тому дослідження питань удосконалення систем доосвічування рослин в спорудах закритого ґрунту із використанням джерел оптичного випромінювання на основі світлодіодів як складової частини менеджменту енергозбереження та підвищення ефективності тепличного виробництва є актуальними і своєчасними.

НУБІП України

РОЗДІЛ 1

ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ОСВІТЛЕННЯ НА РОЗВИТОК І
ПРОДУКТИВНІСТЬ РОСЛИН1.1. Залежність продуктивності рослин від спектральних
характеристик випромінювання

Більшість факторів навколишнього середовища (мінеральне живлення, газовий склад атмосфери, температура, водяний режим і т.д.) виводяться на рівні, які є достатніми для процесів життєдіяльності рослин в штучних умовах. Штучне опромінення є невід'ємною частиною виробничого процесу в сучасних тепличних господарствах. Для вирощування повноцінної рослини, навіть при достатній кількості тепла, вологи і поживних елементів, необхідно здійснювати штучне опромінення, оскільки під впливом *оптичного випромінювання* (ОВ) забезпечується вуглецеве живлення і формування рослин, що є однією з основ для отримання врожаю.

Дослідженням впливу штучного опромінення на зростання і продуктивність рослин займається дисципліна "Світлокультура". Сучасний стан проблеми штучного опромінення рослин показує, що світлокультура є прогресивним агротехнічним засобом, який значно сприяє інтенсифікації тепличного виробництва.

Випромінювання у діапазоні довжини хвиль 380-710 нм називається *фотосинтетичною активною радіацією* (ФАР).

Перші дослідження характеристик зростання і розвитку рослин при використанні штучного опромінення відносяться до кінця XIX – початку XX ст. відмічені у монографії. Академік К.А. Тімірязев відмічав, що по відношенню до рослин необхідно використовувати поняття "промениста енергія", а не "світло", а вимірювання проводити у енергетичних одиницях.

Так, при оцінці ОВ, яке здійснює вплив на фізіологічні процеси рослин, в сучасному уявленні використовують енергетичні показники. Вводиться поняття кількості опромінення або дози опромінення. При цьому, опромінення рекомендують вимірювати у Ватах на 1 м^2 ($\text{Вт}/\text{м}^2$).

З 60-х років ХХ ст., із розвитком обчислювальної техніки та якісних приладів, почали проводитись дослідження впливу окремих спектральних смуг ФАР на фізіологію рослини, а саме зростання і стан рослини під дією червоних, синіх або зелених променів.

Головною вимогою для початку будь-якого фотобіологічного процесу є наявність в рослині речовин, які поглинають випромінювання з певною довжиною хвилі. Такі речовини прийнято називати **фотопігментами**. Оскільки поглинається випромінювання лише певної довжини хвилі, частина світлових хвиль відбивається. В залежності від спектрального складу

відбитого світла пігменти отримують забарвлення – зелене, жовте, червоне та ін. Активація фотопігментів під дією випромінювання переводить молекулу речовини у активний стан, викликаючи ланцюг фотохімічних реакцій. Молекула фотопігмента на кінці ланцюга реакцій переходить у свій первинний стан і може знову поглинати квант випромінювання. Окрім

фотопігментів, у рослин знайдені **фоторецептори**, які активуються при дуже низьких рівнях опромінення і безпосередньо впливають на розвиток рослини.

Будь-яка рослина являє собою складну систему фотопігментів, реакція яких на випромінювання визначає усі біологічні процеси, що у ній протікають, причому ці процеси є численними і часто є незалежними один від одного. У сьогоднішні розрізняють три класи основних фотосинтетичних пігментів: *хлорофіли*, *каротиноїди* та *антоціани*.

На рис. 1.1 схематично зображений відносний розподіл максимумів поглинання різних фотопігментів і фоторецепторів, які були виділені з рослини і очищені. Це фотосинтетичні пігменти (хлорофіл а, хлорофіл b і каротиноїди), які надають забарвлення різним частинам рослин (антоціани), фоторецептори (криптохром, фототропін, фітохром). Пунктиром показано

зміну спектру поглинання фітохрому та фототропіну під дією QV (перехід в іншу спектральну форму).



Рис. 1.1. Спектри поглинання фотобіологічно активних речовин рослин

Найбільш поширеним і найбільш важливим фотосинтетичним пігментом є **хлорофіл** (гр. chloros – зеленуватий, phyllon – лист), який міститься в усіх організмах, що здатні до фотосинтезу.

Хлорофіл (хлорофіл а, хлорофіл б) відіграє надзвичайно важливу роль у складному механізмі поглинання енергії випромінювання і перетворенні її для використання живими організмами. Хлорофіл у рослинах поглинає фотони світла у області, яке сприймається людським оком, і переходить у збуджений електронний стан. Ця енергія збудження може ініціювати ланцюг хімічних реакцій, які приводять в кінцевому рахунку до утворення вуглеводів із оксиду вуглецю і води.

Каротиноїди (лат. carota – морква) утворюють іншу обов'язкову групу фотосинтетичних пігментів. Ці жиророзчинні пігменти мають різне забарвлення – від жовтого до червоного. Причому у зеленних частинах рослин хлорофіл маскує каротиноїди, роблячи їх непомітними до настання холодів. Характерні довжини хвиль променів, що поглинаються: 425, 445, 450, 475 та

480 нм (рис. 1.1). Осінню зелені пігменти руйнуються, і каротиноїди стають добре помітними, визначаючи забарвлення осіннього листя. Каротиноїди в рослинному організмі виконують такі важливі функції, як поглинання променистої енергії, яка недоступна для інших пігментів, і передача її хлорофілам. Крім того, каротиноїди послаблюють фотоокислення хлорофілу у присутності кисню. До каротиноїдів відносяться каротин (помаранчевий), ксантофіл (жовтий), лікопін, лютеїн та ін.

Антоціани – ще одна група пігментів, забарвлення яких зміщене у червону область спектру, коли колір листя може набувати широкого діапазону від рожево-червоного до фіолетового. Антоціани у клітинах виконують не тільки роль речовини, що надає тканинам яскраве привабливе забарвлення. Ці пігменти з'являються у стеблах і листі під дією знижених температур, у ранній весняний і осінній періоди, і слугують свого роду "пасткою" для сонячних променів, вибірково працюючим фільтром. В багатьох рослинах у молодих пагонах антоціани раною весною перетворюють світлову енергію на теплову і захищають їх від холоду. Посилене утворення антоціанів в клітинах рослини відбувається при зупинках синтезу хлорофілу, при інтенсивному опроміненні рослин ультрафіолетом. Вважається, що антоціани захищають

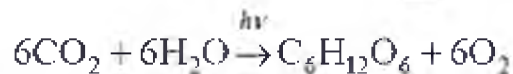
рослину від шкідливого впливу сонячного світла на цитоплазму.

Серед фоторецепторів, що регулюють розвиток рослин протягом усього життєвого циклу, є *фітохром* (ФХ₆₆₀ – неактивна форма та ФХ₇₃₀ – активна форма). Фітохром є фоторецептором, який відповідає за комплекс важливих фотобіологічних процесів в рослині, що отримав назву *фотоморфогенез*.

Отже, діяльність фотопігментів та фоторецепторів відповідає за такі фотопроееси у рослинах, як *фотосинтез*, *фотоморфогенез*, *фотометаболізм*, *фототропізм*, *фотоперіодизм* та ін.

Фотосинтез – найважливіший фотобіологічний процес на нашій планеті, який визначає життя не тільки рослин, але й усіх живих організмів. Для зелених рослин завдяки фотосинтезу забезпечується передача енергії рослині, накопичення її біомаси та виділення кисню в атмосферу.

У відповідності з сучасними уявленнями фотосинтез у живій рослині – складний процес, що складається із численних реакцій. Зазвичай сумарну реакцію фотосинтезу, що відбувається під дією ФВ у області, що бачить людське око (або області ФАР), записують в такому простому вигляді:



Перетворення енергії ФВ у потенціальну хімічну енергію продуктів фотосинтезу (органічна речовина і молекулярний кисень) є основною передумовою і важливим фактором формування продуктивності рослин.

У багатьох випадках для оцінки інтенсивності росту рослин використовують показники інтенсивності фотосинтезу, мірою якого є кількість вуглекислого газу, яка була поглинена рослинами за одиницю часу на одиниці площі – $\frac{\text{CO}_2}{\text{m}^2 \cdot \text{год}}$.

Залежність інтенсивності фотосинтезу від інтенсивності світла на прикладі спірки представлена на рис. 12. Характер кривих показує, що темпи фотосинтезу зростають при збільшенні інтенсивності світла. Це особливо ядро проявляється при низьких рівнях освітленості у зимовий період (до 200 Вт/м^2).

У цьому випадку двократне збільшення світлового потоку призводить до аналогічного збільшення темпів фотосинтезу.

На початку розвитку рослин, коли площа листя невелика, підвищення темпу фотосинтезу відбувається при більш низьких рівнях освітленості, ніж при розвиненому листовому покриві дорослих рослин. Тому на загальному слабкому світловому фоні навіть незначне додаткове освітлення – доосвічування розсади – дає відчутний ефект. У літній час при високому загальному світловому фоні його невелике зниження не спричиняє значного впливу на інтенсивність фотосинтезу.

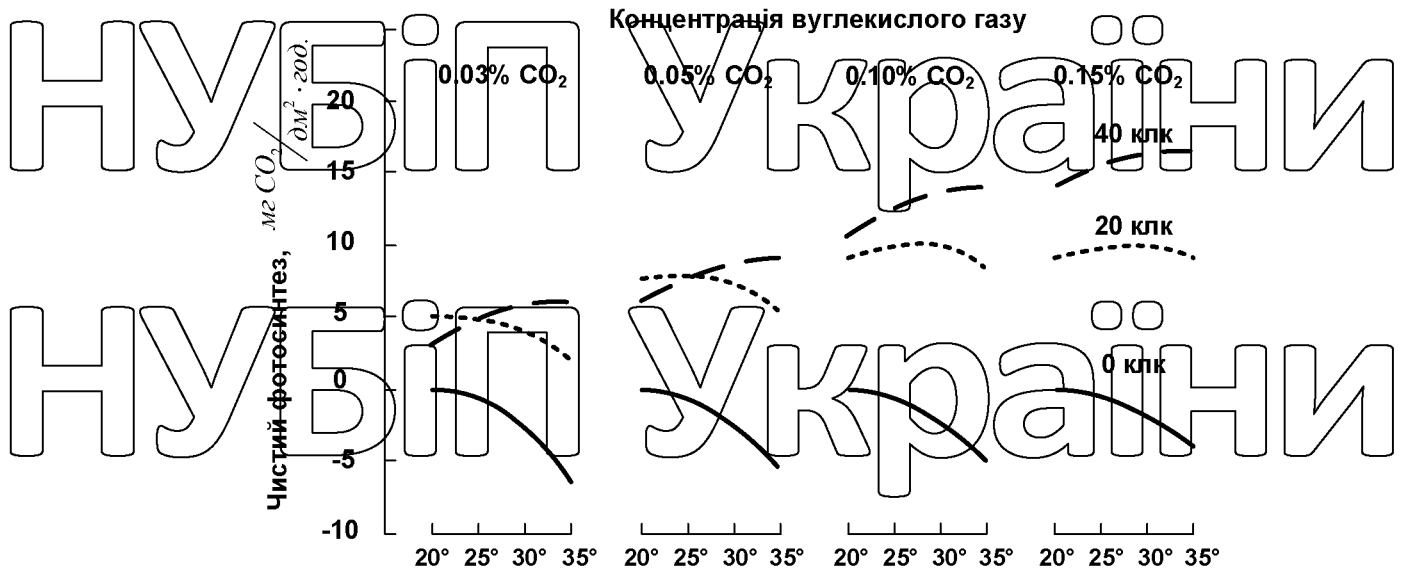


Рис. 1.2 Чистий фотосинтез рослин огірка в залежності від інтенсивності освітлення, температури та вмісту CO₂ у повітрі (за Герлером)

У той же час, невелике зниження світлового рівня, особливо у червоній частині спектру, дозволяє знизити перегрів рослин, збалансувати тепловий та водний режими, і тим самим не просто зберегти вихідний, але й отримати більш високий рівень інтенсивності фотосинтезу. У зв'язку з цим у літній час доцільним є використання спеціальних екранів.

Роль спектрального складу світла для фотосинтезу є дуже важливою. Фізико-біохімічні ефекти, які викликаються впливом червоного або синього світла або навіть простою зміною співвідношення червоних і синіх променів у джерелі світла, є настільки суттєвими, що постає актуальним регулювання фотосинтетичної діяльності рослини за допомогою зміни спектрального складу світла.

Для більш точної оцінки дії оптичного випромінювання його ділять на окремі ділянки, які спричиняють різний фізіологічний вплив:

280-320 нм – впливає, у більшості випадків, шкідливим чином на зростання і розвиток рослин;

320-400 нм – спричиняє вплив на регуляторні процеси в розвитку рослин, завдяки чому включення до складу променистого потоку невеликої кількості такого випромінювання є доцільним;

400-500 нм ("синій") – поглинання жовтими пігментами, другий пік абсорбції хлорофілом, другий пік фотосинтезу, активізуються процеси плодоношення, відіграє важливу роль, повинен бути наявним для забезпечення фотосинтезу і регуляції;

500-600 нм ("зелений") – має високу проникну здатність, є корисним для фотосинтезу оптично щільного листа, листа нижніх ярусів, щільних висівів, найменша фізіологічна реакція;

600-700 нм ("червоний") – зона максимального фотосинтетичного ефекту синтезу хлорофілу, сприяє інтенсивному накопиченню біомаси та ранньому цвітінню, найбільш важлива ділянка для забезпечення розвитку і регуляції процесів. Є обов'язковою складовою в променистому потоці для забезпечення високого рівня фотосинтезу, однак монохроматичне червоне світло може призвести до ненормального розвитку і загибелі рослини;

700-750 нм ("дальній червоний") – в основному ефект витягування стебла, яскраво виражена регуляторна дія, достатньо декілька відсотків у загальному спектрі.

1.2. Аналіз штучних джерел світла для опромінення рослин

Із появою потужних ламп розжарювання (ЛР) почали проводитися дослідження із штучного опромінення у промислових теплицях. ЛР є джерелом переважно червоних та інфрачервоних променів – до 80-90% усього випромінювання. Звичайні ЛР майже не мають ультрафіолетового випромінювання (менше 1%).

У виробничій практиці ЛР інколи використовуються при невеликих питомих потужностях, коли немає необхідності у високому рівні опромінення, наприклад, при вирощуванні деяких видів квітів або продовженні світлового дня. З цією метою опромінювальні установки із ЛР використовують у теплицях Голландії, Франції, Англії. ЛР є простими і зручними в експлуатації, однак вони не набули широкого поширення у рослинництві, оскільки при високому енергетичному ККД ($\eta_{\text{e}} = 14\%$) вони мають порівняно низький світловий ККД (до 2-4% ФАР). Наявність у їх спектрі великої кількості червоних та інфрачервоних променів викликає ненормальне витягування стебла, деформацію листя та перегрівання рослин.

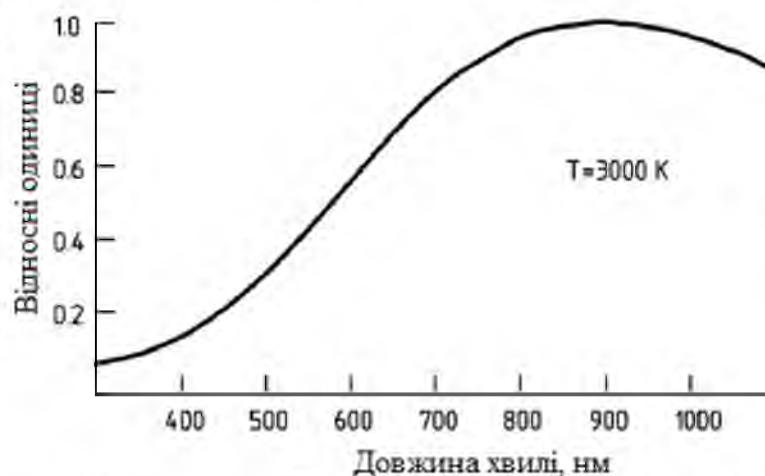


Рис. 1.3. Розподіл енергії у спектрі випромінювання лампи розжарювання (температура вольфрамової нитки 3000°K)

Наступним етапом стало використання газорозрядних ламп, що призвело до вирощування рослин не тільки у виробничих теплицях і лабораторіях, але й у тепличних господарствах. Ці джерела оптичного випромінювання отримали подальший розвиток у вигляді постійного удосконалення і є більш економічними, ніж ЛР.

Газорозрядні лампи – це джерела світла, у яких випромінювання виникає в результаті електричного розряду в атмосфері щертних газів, парів металів або їх сумішей. Усі газорозрядні джерела СВ поділяється на джерела високого та низького тиску. Джерела низького тиску – люмінесцентні лампи,

натрієві, дугові паросвітні, дугові газосвітні. Джерела високого тиску – дугові ртутні із домішками йодидів металів, дугові ртутно-вольфрамові, ксенонові, натрієві лампи.

У газорозрядних ламп у більшості випадків спостерігається лінійний спектр, що характерний для даної речовини, яка світиться. Відносна яскравість ліній та кількість енергії у їх випромінюванні визначаються тиском газу і хімічним складом скляних колб і трубок. Люмінесцентним (ЛЛ) і дуговим лампам притаманним є змішаний спектр, де суцільний фон складається із окремих ліній випромінювання.

Строк служби газорозрядних ламп може доходити до 10-12 тис. год. Запалювання і нормальний режим роботи лампи забезпечується пуско-регулюючою апаратурою. Лампи є чутливими до коливань температури і вологості навколишнього середовища, експлуатуються при температурі від +5 до +35°C і вологості до 65%.

Спеціальні ЛЛ для опромінення рослин, такі, як тепличні люмінесцентні фотосинтезні лампи (ЛФ-40-1 та ЛФ-40-2), мають світловіддачу на 40-50% вищу, ніж звичайні, потужністю 40Вт. Температура колби лампи при 15-20 год. горіння не перевищує 45-50°C, що дозволяє наближувати їх до рослин.

Лампа ЛФ-40-1 із однокомпонентним люмінофорним покриттям має максимум випромінювання у червоній області і призначена для опромінення розсади огірка. Лампа ЛФ-40-2 із двокомпонентним люмінофорним покриттям і максимумом випромінювання у червоній і синій областях призначена для розсади томатів.

Успішно у світлокультурі використовуються ЛЛ ЛФР-150, у спектрі яких переважає помаранчево-червоне випромінювання (рис. 1.4). За рахунок рефлекторного шару у верхній частині колби відбувається перерозподіл світлового потоку у нижню напівсферу лампи, що дозволяє отримати опромінення до 150 Вт/м² ФАР. Строк служби таких ламп 5,0 тис. год.

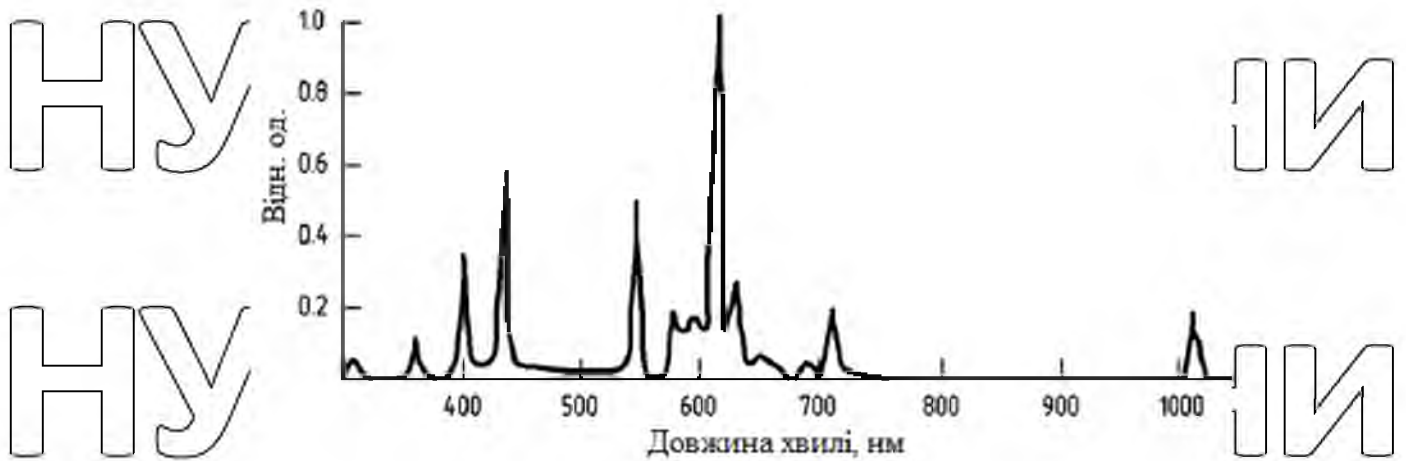


Рис. 1.4. Розподіл енергії світла по спектру лампи ЛФР-150

ЛЛ лампи мають ряд переваг: великий ККД (9-12%) в області ФАР, сприятливий вплив на рослини, низька температура колби і тривалий строк служби, зручність використання при обмежених висотах підвісу. До недоліків

ЛЛ відносять наявність пуско-регулюючої апаратури; великі габаритні розміри світильників, внаслідок чого утворюється тінь у сонячну погоду. Крім того, оптимальний інтервал робочих температур ЛЛ вважається 18...25°C.

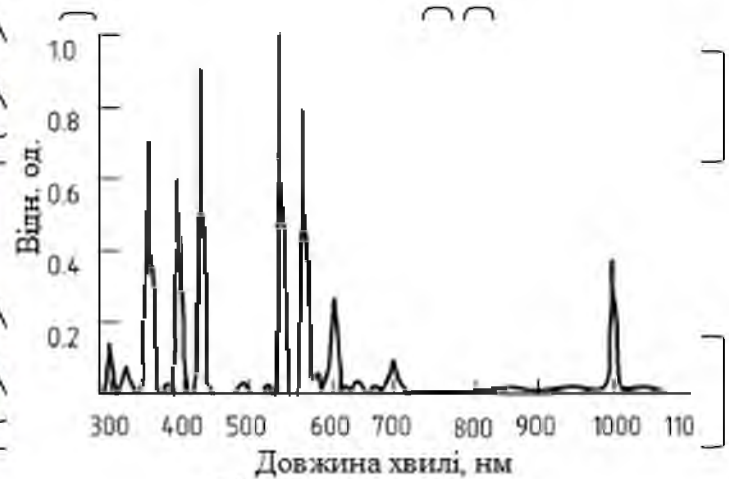
При низьких плюсових температурах повітря напруга запалювання ламп збільшується на 20...25%, при мінусових температурах ймовірність запалювання наближається до нуля. Збільшення відносної вологості повітря до 90% також супроводжується до підвищення напруги запалювання ламп.

Серед газорозрядних ламп високого тиску в теплицях України використовуються ДРЛФ-400, ДНаТ-400, ДНаЗ-400 та ін.

Лампи ДРЛФ-400 (рис. 1.5) – дугові ртутно-люмінесцентні фітолампи потужністю 400Вт. Лампа має лінійний спектр із великими інтервалами між лініями

Макимум випромінювання припадає на синю (436 нм) та зелену (550 нм) області спектру. Внаслідок відсутності у спектрі цих ламп випромінювання в червоній області (640-680 нм) ці лампи не придатні для вирощування при повністю штучному освітленні. Крім неговноцінності спектру лампи мають низький ККД по ФАР (до 12%). Однак вони знаходять

широке використання для доосвітчування розсади огірків і томатів у теплицях, як джерело синьо-фіолетового випромінювання, якого недостатньо у сонячному спектрі у зимовий час. Розсада, що вирощена з використанням ламп ДРЛФ-400, має короткі стебла і пагони, потовщену пластину листа із високим вмістом хлорофілу.



а)

б)

Рис. 1.5. Лампи ДРЛФ-400 у теплиці (а)

та їх розподіл енергії світла по спектру (б)

Лампи ДРЛФ вмикають у мережу через пуско-регулюючу апаратуру

(ПРА), вартість якої складає від 50 до 250% від вартості лампи, при цьому

вони мають вагу від 10,5 до 52 кг на 1кВт потужності, що збільшує навантаження на тепличні конструкції. При використанні цих ламп при рівні опромінення вище 150 Вт/м² ФАР необхідна примусова вентиляція для усунення перегрівання рослин.

ДНаТ-400 – натрієві лампи високого тиску потужністю 400Вт (рис. 1.6), які дають випромінювання у жовто-помаранчевій області спектру із максимумом 594-600 нм.

Лампи мають високий ККД по ФАР – 28-30%, однак спектр цих ламп також є неповноцінним, і для його "виправлення" необхідно додати випромінювання у синій області і бажано у червоному спектральному діапазоні 660-680 нм. Рослини, які вирощені при незначному випромінюванні цих ламп, є витягнутими, містять меншу кількість хлорофілу. Ці лампи

ефективні при дозвічванні розсади, але менш придатні для вирощування плодкових культур при повному штучному освітленні.

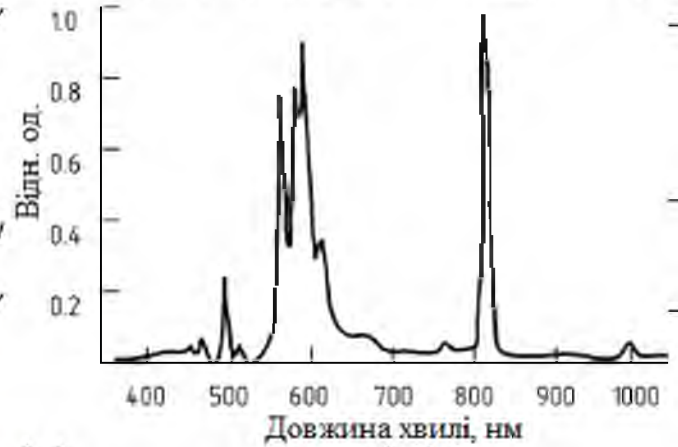


Рис. 1.6. Лампи ДНаТ-400 (а) та їх розподіл енергії світла по спектру (б)

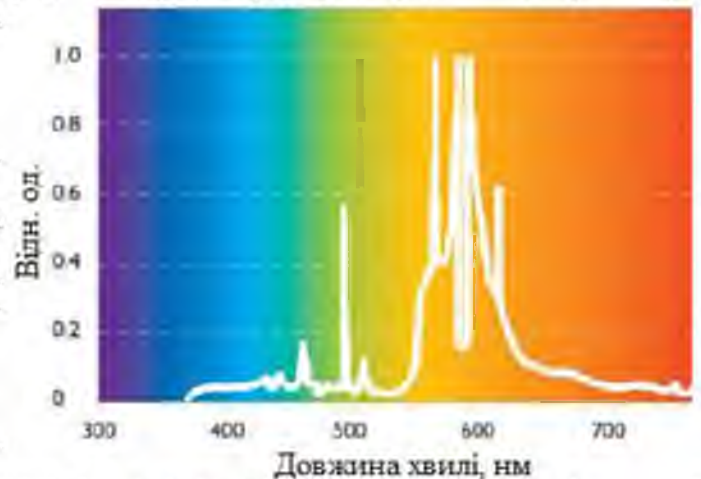


Рис. 1.7. Лампи ДНа3 Lucalox HO (а) та її розподіл енергії світла по спектру (б)

Параметри натрієвих ламп високого тиску є стабільними у широкому діапазоні зовнішніх умов. Маючи сприятливий спектр для ряду культур, ці лампи з успіхом використовуються в овочівництві, квітниках, селекції, у дослідницькій практиці.

Сучасні натрієві лампи високого тиску Lucalox HO фірми GE (рис. 1.7) є переважними для масштабного професійного рослинництва. Вони являють в даний час комбінацію джерел світла високої ефективності

(енергоекономічності), гарного світлорозподілу і великого строку служби.

Лампа Lucalox HO містить амальгаму натрію та ртуті, яка знаходиться не у розрядній трубці, а у зовнішньому металевому резервуарі розрядної трубки.

Спектр ксенонових ламп є близьким до сонячного, що дозволяє успішно використовувати їх у зимовій світлокультурі овочевих рослин із використанням штучного випромінювання. Лампи мають неперервний спектр випромінювання (рис. 1.8) в діапазоні від 200 до 1300 нм, світловіддачу 34 лм/Вт при строку служби до 1,5 тис. год. Однак випромінювання в області близько 200 нм та близько 900 нм значно перевищує сонячне, що потребує захисту від цих променів. Лампи виготовляються потужністю 2-50 кВт.

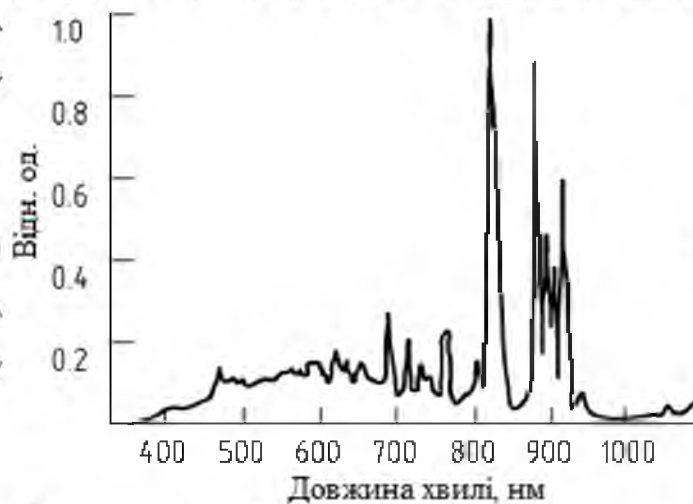


Рис. 1.8. Розподіл енергії світла по спектру ксенонової лампи

До позитивних сторін ксенонових ламп можна віднести відсутність дроселя, екологічну чистоту газового розряду, малий коефіцієнт затінення.

Основним недоліком є необхідність використання імпульсної напруги (20 кВ) для пропалювання лампи з відповідним приладним і кабельним забезпеченням, порівняно невисокий (15-17%) енергетичний ККД і ряд інших незручностей.

Металогалогенні рослиницькі лампи (МГЛ). В наш час для світлокультури виготовляють ряд МГЛ з різими домішками йодидів металів. МГЛ також мають лінійчастий спектр і недостатнє випромінювання у червоній області, тим не менш вони дуже перспективні, оскільки мають

високий ККД (25-30%) і відносно більш повним спектром порівняно з іншими високоінтенсивними джерелами світла.

ДРИ-2000-6 – це МГЛ потужністю 2 кВт (рис. 1.9) із наповненням, що містить йодиди натрію і скандію. За ККД (29-30%) і по спектральним характеристикам ця лампа є найкращою серед МГЛ, які використовуються для вирощування рослин.

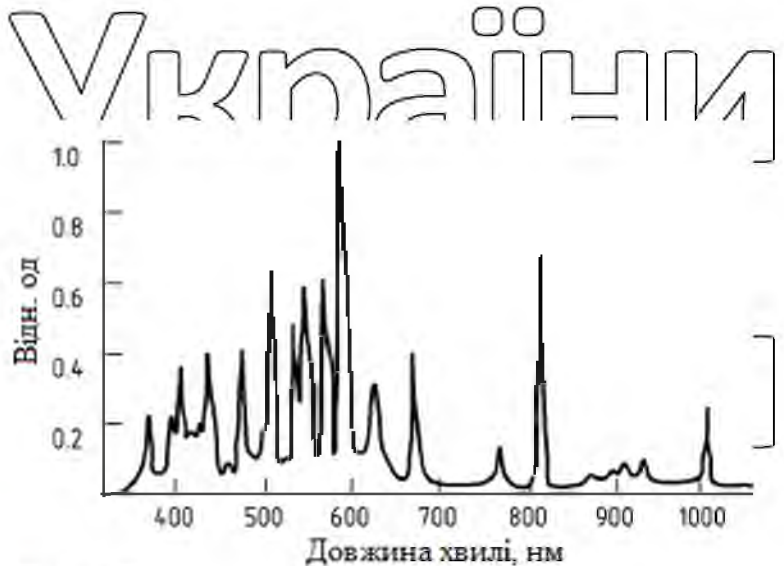


Рис. 1.9 Лампа ДРИ-2000-6 (а) та її розподіл енергії світла по спектру (б)

Лампа ДРИ-2000-6 має лінійчастий спектр випромінювання в області ФАР; її світловіддача досягає 95 лм/Вт, строк служби 2,0 тис. годин і більше. Поява ламп ДРИ із наповненням, що випромінює у вузьких ділянках спектру, створило реальну можливість використання різних спектральних ділянок ФАР у широкому діапазоні інтенсивностей.

До позитивних якостей МГЛ слід віднести: простоту монтажу, високу світловіддачу, роботу у важких температурних умовах, сприятливий вплив на рослину за рахунок підвищення енерговіддачі в області ФАР. Поряд із цим є негативні моменти: наявність важкої ПРА і, відповідно, велике навантаження на конструкцію теплиці, велику нерівномірність опромінення (50-70%).

Техніко-економічні показники джерел ОВ, що використовуються у світлокультурі тепличного виробництва, наведені в таблиці 1.

Таблиця 1.1.

Техніко-економічні показники джерел оптичного випромінювання

Тип	Джерело оптичного випромінювання	P, кВт	Строк служби, тис. год.	ККД ФАР, %
Люмінесцентні	ЛБ-40	0,04	12	22
	Osram Fluora	0,018	10	20-22
Ртутні високого тиску	ДРЛФ-400	0,4	1	11
	ДРФ-1000-04	1,0	2	11
Натрієві високого тиску	MASTER SON-T PIA	0,4	17	28
	Agro-400			
	ДНаТ-400	0,4	12	26
	ДНаЗ-600	0,6	18	30
	Sylvania GroLux SHP-TS	0,25	24	26-28
	Sylvania GroLux SHP-TS	0,4	24	26-28
	MASTER GreenPower	0,6	10	26-28
	PLANTASTAR	0,6	12	35
Металогалогенні	Grownmaster HIT	0,25	10	25
	ДРИ-2000-6	2,0	2	26
Ксенонові	ДКсКЛ 10000	10,0	20	12-16
	ДКсТВ 6000	6,0	< 1	12-16

1.3. Використання світлодіодів для освітлення рослин у

захищеному ґрунті

Світлодіод (англ. *light-emitting diode, LED*) напівпровідниковий прилад

із електронно-дірковим переходом, який створює ОВ при пропусканні через нього електричного струму у прямому напрямку.

Світлодіоди випромінюють світло тільки у вузькому спектрі, який визначається напівпровідниковим матеріалом. Тому представлені у продажу в основному світлодіоди різних кольорів – синій, голубий, зелений, янтарний, червоно-помаранчевий, червоний та ін. Таким чином, складаючи комбінації із світлодіодів різних кольорових груп, можна отримати джерело ОВ із практично будь-яким спектральним складом у діапазоні, який сприймає людське око.

Основні сумасні матеріали, що використовуються в кристалах сучасних

світлодіодів:

- InGaN – суміш нітриду галію та нітриду індію – сині, зелені та ультрафіолетові світлодіоди високої яскравості (рис. 1.10);

- AlGaInP – суміш фосфіду алюмінію, фосфіду галію та фосфіду індію – жовті, помаранчеві червоні світлодіоди високої яскравості;

- AlGaAs – арсенід алюмінію-галію – червоні та інфрачервоні світлодіоди;

- GaP – фосфід галію – жовті та зелені світлодіоди.



Рис. 1.10. Діапазон спектрів випромінювання потужних світлодіодів

На відміну від ЛР, світлодіод керується струмом. Падіння напруги на світлодіоді у прямому напрямку – характеристика непостійна, розкид її значень для світлодіодів одного типу може складати до $\pm 10\%$ від середнього значення. Крім того, падіння напруги на світлодіоді буде змінюватися в залежності від умов експлуатації (температури навколишнього середовища, температури кристалу світлодіоду, а також струму, що протікає через світлодіод, а також від тривалості експлуатації (внаслідок деградації кристалу).

Як видно з рис. 1.11, у робочих режимах струм експотенціально залежить від напруги, і незначні зміни напруги призводять до великих змін струму. Оскільки світловий вихід прямо пропорційний струму, то і яскравість світлодіоду є нестабільною, тому струм необхідно стабілізувати. Крім того, якщо струм перевищить допустимі межі, перегрівання світлодіоду призведе до його прискореного старіння.

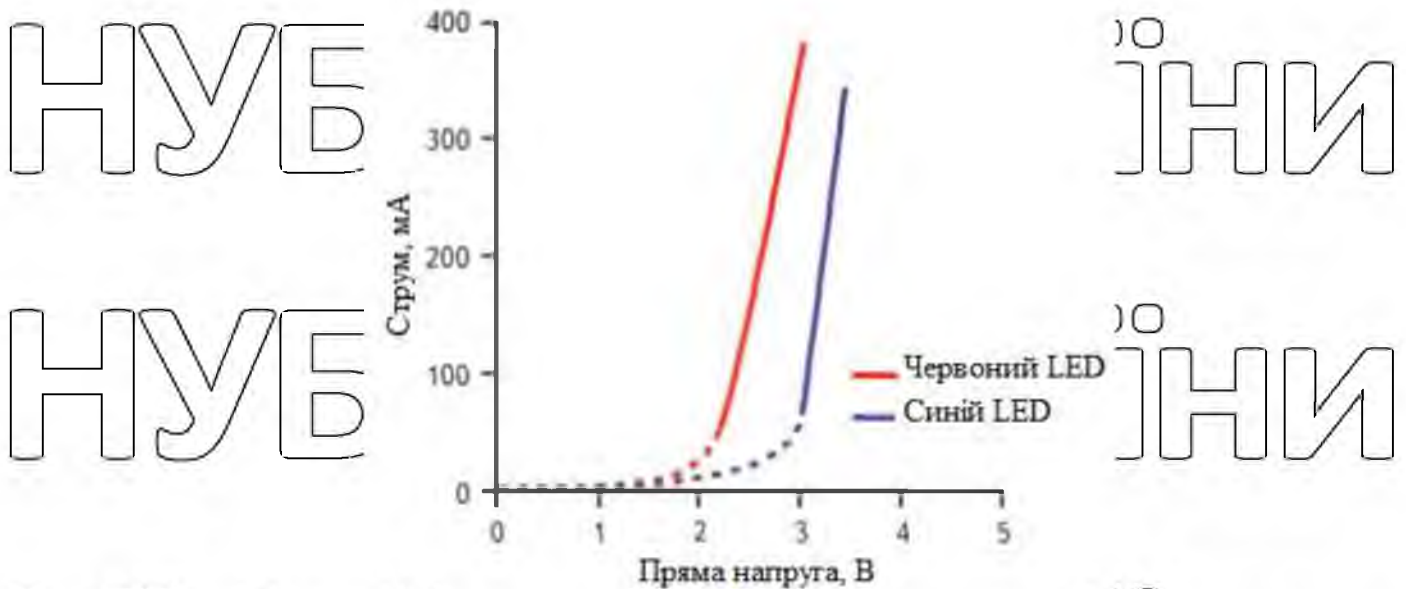


Рис. 1.11. Залежність сили струму від напруги живлення світлодіоду

Для найбільш ефективного живлення (із найменшими втратами) і тим самим підвищення ККД, використовують спеціальні AC/DC- або DC/DC-перетворювачі – світлодіодні драйвери. Однією із задач таких драйверів є підтримання постійного струму на світлодіоді (типове значення для потужних світлодіодів – 350 мА) шляхом динамічної зміни напруги.

Раніше в світлодіодних збірках було дуже багато світлодіодів. Зараз, по мірі збільшення потужності, світлодіодів стає менше, але удосконалюється оптична система, яка спрямовує світловий потік у бажаний тілесний кут і відіграє усе більшу роль.

Світлодіодні системи здатні забезпечити чисельні переваги відносно традиційних систем освітлення:

- енергоефективність;
- світлодіодні джерела світла є спрямовані і випромінюють світло тільки у необхідному напрямку, а значно менша поверхня випромінювання, ніж у традиційних ламп, дозволяє використовувати більш ефективну оптику і краще керувати світлом;

- якість світла бліх світлодіодів (за технологією RGB-матриць із люмінофорним покриттям) тепер є співставною із якістю світла ЛР, ДЛ,

розрядних ламп високого тиску. Останні досягнення в області виробництва світлодіодів забезпечує стабільність кольору та "кошторову" температуру, еквівалентні або переважаючі ці характеристики традиційних джерел світла;

- суттєво збільшений корисний строк служби світлодіодів порівняно із традиційними джерелами світла, що значно скорочує витрати на заміну та обслуговування (наприклад, галогенні лампи слід змінювати в 12-20 разів частіше, ніж світлодіодні);

- на відміну від традиційних джерел світла, світлодіоди можуть використовуватись навіть після суттєвого зниження світлового потоку. При цьому повний вихід з ладу відбувається дуже рідко;

- з моменту появи світлодіодів щорічно відмічається 35%-е підвищення їх ефективності (за параметрами світлового потоку при одночасному щорічному зниженні їх вартості в середньому на 20%. Іншими словами, загальна ефективність світлодіодів подвоюється кожні 1,5-2 роки;

- світлодіодні освітлювальні прилади генерують тепло, але промені світла, які вони випромінюють, є холодними. Світлодіодні світильники із належним чином сконструйованим тепловідводом захищають користувачів від надлишкового і шкідливого тепла;

- світлодіодні джерела світла (рис. 1.12) можуть функціонувати при низьких температурах і витримувати вплив вібрацій, що дозволяє використовувати вплив вібрацій, що дозволяє використовувати їх у суворих умовах, де неможливо встановлювати і використовувати традиційні лампи. У світлодіодів немає рухомих частин і спіралі розжарювання, які можуть легко руйнуватися і виходити з ладу;

- світлодіодні світильники, побудовані на RGB-матрицях із люмінофорних покриттях, що випромінюють біле світло, із налагоджувальною апаратурою можуть відтворювати мільйони кольорів і мати різні кольорові температури без використання світлофільтрів;



Рис. 1.12. Тепличне освітлення на базі світлодіодних світильників

- керування роботою світлодіодних систем освітлення може здійснюватися за допомогою цифрових контролерів, які забезпечують максимальну ефективність і високу гнучкість;

- світлодіодні лампи є безінерційними: вони не потребують часу для прогрівання або відключення, в них відсутній шкідливий вплив циклічної подачі живлення та диммірування;

- якісно розроблені світлодіодні системи освітлення забезпечують простоту та гнучкість встановлення, не потребують додаткових джерел живлення - достатньо звичайної електропроводки;

- на відміну від люмінесцентних ламп, які містять ртуть і вимагають спеціального поводження і утилізації, світлооди не містять ртуті і є безпечними для навколишнього середовища.

НУБІП України

Сучасні світлодіоди перекривають весь діапазон спектру ОВ: від червоного до ультрафіолетового кольору. Таким чином, складаючи комбінації зі світлодіодів різних кольорових груп, можна отримати джерело світла з практично будь-яким спектральним складом у діапазоні, що сприймається людським оком. Це дозволяє при опроміненні рослин створити джерело ОВ, у якому буде оптимальна відповідність відносної спектральної ефективності фотосинтезу рослин, або використати серійні світлодіодні світильники для доповнення існуючих тепличних систем доосвітчування на базі перелічених вище рослинницьких ламп.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ СВІТЛОДІОДНОЇ СИСТЕМИ
ОПРОМІНЕННЯ РОСЛИН2.1. Математична модель моніторингу ефективної енергетичної
освітленості зони вирощування теплиць

Першим етапом процесу вимірювального моніторингу ефективної енергетичної освітленості теплиць є вимірювання інтегрального рівня природної освітленості. Зовнішнє засвічування від дії природного джерела світла описується нормованою спектральною характеристикою стандартного джерела світла, як показано на рис. 2.1, 1.

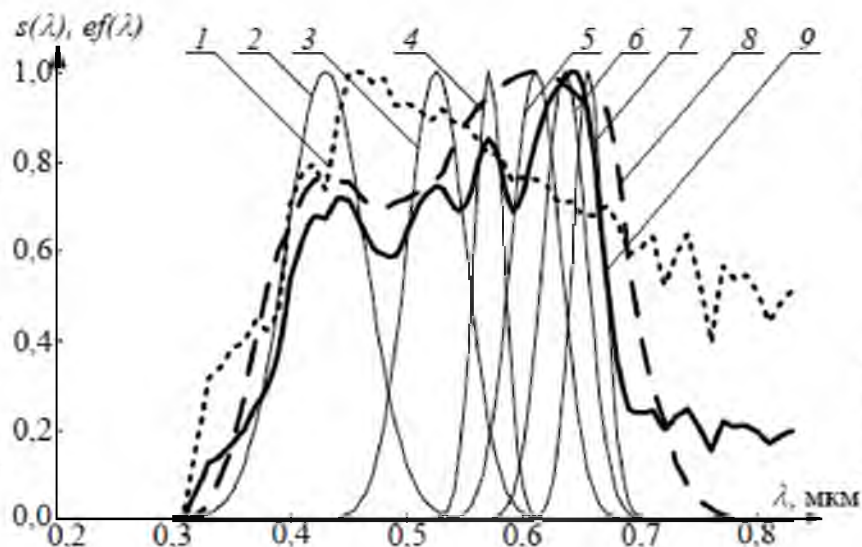


Рис. 2.1. Спектральний розподіл показників ефективності фотосинтезу
тепливної флори

На рис. 2.1 прийняті такі позначення: 1 – нормована спектральна характеристика зовнішнього освітлення; (2...7) – нормовані спектральні характеристики потужності випромінювання світлодіодів: blue (2) з центральною довжиною випромінювання $\lambda_0=0,430$ мкм, ultra green (3) $\lambda_0=0,525$ мкм; green (4) $\lambda_0=0,570$ мкм; super red (5) $\lambda_0=0,610$ мкм; red (6) $\lambda_0=0,635$ мкм;

ultra red (7) $\lambda_0=0,655$ мкм; 8 – необхідна відносна спектральна ефективність фотосинтезу; 9 – відносна спектральна ефективність фотосинтезу, що отримана в результаті дії світлодіода і зовнішнього освітлення.

Для забезпечення необхідного рівня та спектрального складу штучного доосвічування тепличних культур у даній магістерській роботі використано світлодіоди, які мають ряд переваг щодо інших типів джерел штучного світла.

На підставі аналізу характеристик серійних світлодіодів, під час моделювання вищезазначеного процесу запропоновано використовувати світлодіоди фірми

Bet Lux Electronics BL-L324. Такі світлодіоди мають максимальну силу світла

від 1800 до 5000 мкд під час живлення постійним струмом 30 мА, а також половинний кут розсіювання $\alpha = 13^\circ$

Спектральні характеристики потужності випромінювання світлодіодів апроксимовано експоненціальною функціональною залежністю, з відносною невизначеністю апроксимації не більше $\pm 3\%$:

$$S_{\text{СВД}}(\lambda) = S_0 \cdot s_{\text{СВД}}(\lambda) = S_0 \cdot e^{-r^2(\lambda - \lambda_0)^2} \quad (2.1)$$

де $S_{\text{СВД}}$ – спектральна щільність потужності випромінювання, Вт/мкм,

S_0 – спектральна щільність потужності при довжині хвилі λ_0 , Вт/мкм;

$s_{\text{СВД}}$ – нормована спектральна щільність потужності випромінювання світлодіода;

r – параметр, що визначає напівширину спектру випромінювання світлодіода;

λ – довжина хвилі випромінювання, мкм;

λ_0 – центральна довжина хвилі випромінювання світлодіода, мкм.

Параметри обраних світлодіодів (λ_0 , $\Delta\lambda$, r), що випускаються серійно промисловістю і відповідають рис. 2.1, наведені у таблиці 2.1. На підставі

порівняльного аналізу параметрів світлодіодів, наведених у цій таблиці,

встановлено, що різні типи світлодіодів мають значний розкид за показником

сили світла. Для адекватного зіставлення цього параметра з регламентованими

у нормативній документації діапазоном вимірювань енергетичної освітленості

розроблено математичну модель процесу комп'ютеризованого моніторингу

штучного доосвічування тепличних культур за результатами вимірювань ефективної освітленості у видимому оптичному діапазоні з обліком добової динаміки природного світла. Така модель побудована на базі функціональних перетворень оптичних характеристик випромінювання зі світлової (v) до енергетичної (e) системи

$$\begin{matrix} I_v \rightarrow \Phi_v \rightarrow \\ s_{\text{СВД}}(\lambda) \rightarrow \end{matrix} \quad \Phi_e \rightarrow E_e \rightarrow n_i^{\text{max}} \rightarrow n_i^{\text{on}}/n_i^{\text{off}} \quad (2.2)$$

де I_v – сила світла, кд;

Φ_v – світловий потік, лм;

$s_{\text{СВД}}(\lambda)$ – нормована спектральна щільність потужності випромінювання світлодіоду від зміни довжини хвилі λ ;

Φ_e – променистий потік випромінювання, Вт;

E_e – енергетична освітленість, Вт/м²;

n_i^{max} – загальна кількість світлодіодів у одному світильнику для вирощування томатів і огірків;

$n_i^{\text{on}}/n_i^{\text{off}}$ – необхідна кількість світлодіодів у ввімкненому або

вимкненому стані для доосвічування конкретних типів культур;

i – тип світлодіода.

Для перерахунку сили випромінювання до світлового потоку використовується наступна функціональна залежність:

$$\Phi_v = \int_{\Omega} I_v d\Omega. \quad (2.3)$$

де Φ_v – світловий потік, лм;

I_v – сила світла, кд;

Ω – тілесний кут, ср, який залежить від площі частини сфери з

центром у вершині кута, яка вирізається цим тілесним кутом, та радіусу такої сфери:

$$d\Omega = \frac{dS}{R^2}, \quad (2.4)$$

де $d\Omega$ – елемент тілесного кута, ср, виражений через інтервали лінійних кутів азимута;

dS – площа частини сфери з центром у вершині кута, m^2 , яка вирізається цим тілесним кутом; R – радіус даної сфери, м.

Елемент тілесного кута для сферичної системи координат визначається за формулою

$$d\Omega = \frac{dS}{R^2} = \frac{R^2 \sin\theta d\theta d\varphi}{R^2} = \sin\theta d\theta d\varphi, \quad (2.5)$$

де $d\Omega$ – елемент тілесного кута, ср; dS – площа частини сфери, m^2 ; R – радіус сфери, м; θ – лінійний кут азимута, град.; $d\theta$ і $d\varphi$ – інтервали лінійних кутів, град.

СВД, що використовуються, є ізотропними джерелами, а отже, їх поле випромінювання характеризується досить високим ступенем симетрії та є круглосиметричним. Напрямок обирається довільно, адже під час такого вибору системи координат інтенсивність не залежить від кута θ . Тому, інтегрування за параметром θ у цьому випадку зводиться до множення на 2π .

Нормоване значення просторового розподілу сили випромінювання використуваних типів світлодіодів апроксимовано функцією $\cos^b(\theta)$, де θ – лінійний кут азимута, з параметром $b=27$, під час цього відносна невизначеність апроксимації не перевищує $\pm 5\%$. У такому випадку інтенсивність оптичного випромінювання залежить тільки від параметра θ , а під час інтегрування за цим параметром виконується наступна рівність:

$$\begin{aligned} \Phi_v &= 2\pi \int_0^\alpha I_v(\theta) \sin(\theta) d\theta = 2\pi \int_0^\alpha I_{0v} \cos^b(\theta) \sin(\theta) d\theta = \\ &= I_{0v} \frac{2\pi}{b+1} [1 - \cos^{b+1}(\alpha)], \end{aligned} \quad (2.6)$$

де Φ_v – світловий потік, лм;

I_v – сила світла, кд;

θ – лінійний кут азимута, град.;

I_{α} – максимальне значення сили світла при $\theta=0^\circ$;

$d\theta$ – інтервал збільшення лінійного кута азимута, град.;

α – половинний кут розбіжності, відповідно, повний кут випромінювання становить 2α , град.;

b – параметр апроксимації нормованого просторового розподілу сили випромінювання світлодіоду.

Для визначення променистого потоку випромінювання виконується абсолютизація світлового потоку випромінювання на основі нормованої

спектральної щільності потужності світлодіодів і відносної спектральної світлової ефективності монохроматичного випромінювання для денного зору

$$\Phi_e = \frac{\Phi_v}{K_m \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} s_{\text{СВД}}(\lambda) v(\lambda) d\lambda} \quad (2.7)$$

де Φ_e – променистий потік випромінювання, Вт;

λ_{\min} і λ_{\max} – нижня й верхня межа спектра випромінювання, які

відповідно дорівнюють 0,36 і 0,83 мкм;

Φ_v – світловий потік, лм;

$s_{\text{СВД}}(\lambda)$ – нормована спектральна щільність потужності випромінювання СВД від зміни довжини хвилі λ ;

K_m – максимальна світлова спектральна ефективність, що відповідає

довжині хвилі 0,555 мкм для стандартного фотометричного спостерігача при денному зорі, яка дорівнює 683 лм/Вт;

$v(\lambda)$ – відносна спектральна світлова ефективність монохроматичного випромінювання для денного зору.

Енергетична освітленість розраховується через променистий потік

випромінювання за такою формулою

$$E_e = \frac{\Phi_e}{S} = \frac{\Phi_e}{\pi h^2 \tan^2(\alpha)} \quad (2.8)$$

де E_e – енергетична освітленість, Вт/м²;
 Φ_e – променистий потік випромінювання, Вт;

S – площа освітлюваної поверхні, м²;

h – відстань від джерела випромінювання до поверхні, м;

α – половинний кут розбіжності, град.

На базі отриманих вище функціональних залежностей (2.1) – (2.8) з урахуванням характеристик сучасних серійних світлодіодів (див. табл. 2.1),

топології розміщення систем доосвічування, актуальних регламентованих

вимог щодо інтенсивності та спектрального складу тепличного освітлення, а

також добової норми доосвічування типових тепличних культур і

статистичних даних щодо динаміки рівня природної освітленості для помірно

континентального кліматичного поясу, отримала подальший розвиток

математична модель процесу комп'ютеризованого моніторингу штучного

доосвічування тепличних культур за результатами прецизійних вимірювань

ефективної енергетичної освітленості у видимому оптичному діапазоні.

Під час моделювання отримано залежності динаміки одночасно

задіяних модулів світлодіодів (n , шт.) (див. рис. 2.2, 2 – для огірків та рис. 2.2,

4 – для томатів) залежно від часу доби (t , год.). Кожен з таких модулів має

бути обладнаний наступною кількістю світлодіодів: Red – 12 шт., Green – 18

шт. і Blue – 10 шт. З обліком типів вирощуваних культур встановлено

розподіл світлодіодів, які повинні знаходитись одночасно у ввімкненому або

вимкненому станах (див. рис. 2.2, 1 – для огірків і рис. 2.2, 3 – для томатів). На

рис. 2.2 позначено 1 – режими роботи світлодіодів у модулі штучного

доосвічування для огірків; 2 – кількість модулів для доосвічування огірків; 3 –

режими роботи світлодіодів у модулі штучного доосвічування для томатів; 4 –

кількість модулів для доосвічування томатів.

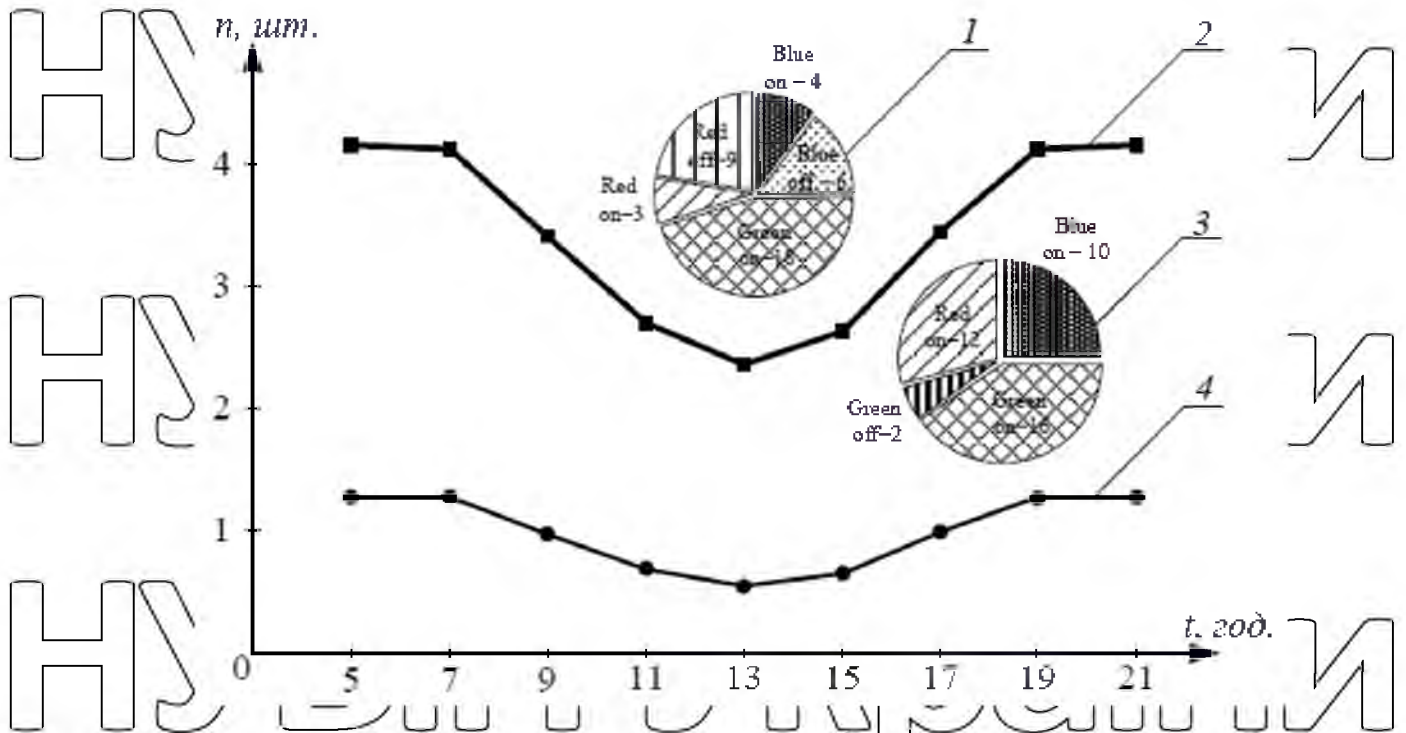


Рис. 2.2. Динаміка зміни кількості світлодіодних модулів, що необхідні для доосвічування тепличних культур

Таким чином, на основі результатів проведених досліджень методами математичного моделювання поставлено вимоги до інформаційно-вимірювальних компонент системи під час комп'ютеризованого моніторингу освітленості промислових теплиць, яка базується на визначенні інтенсивності, спектрального складу та добових коливань сумарного впливу природного й штучного джерел випромінювання. Сутність запропонованого підходу полягає в адаптації режимів роботи світлодіодних джерел освітлення теплиць (типи і кількість задіяних світлодіодів у світильнику) за результатами моніторингу ефективної енергетичної освітленості в заданому спектральному діапазоні до типів і періодів вегетації культур.

2.2. Математичне моделювання спектрального складу світлодіодного випромінювача

Як вже було показано, у зеленого листа є загальна залежність спектра дії фотосинтезу і може бути представлена у наступному вигляді (рис. 2.3).

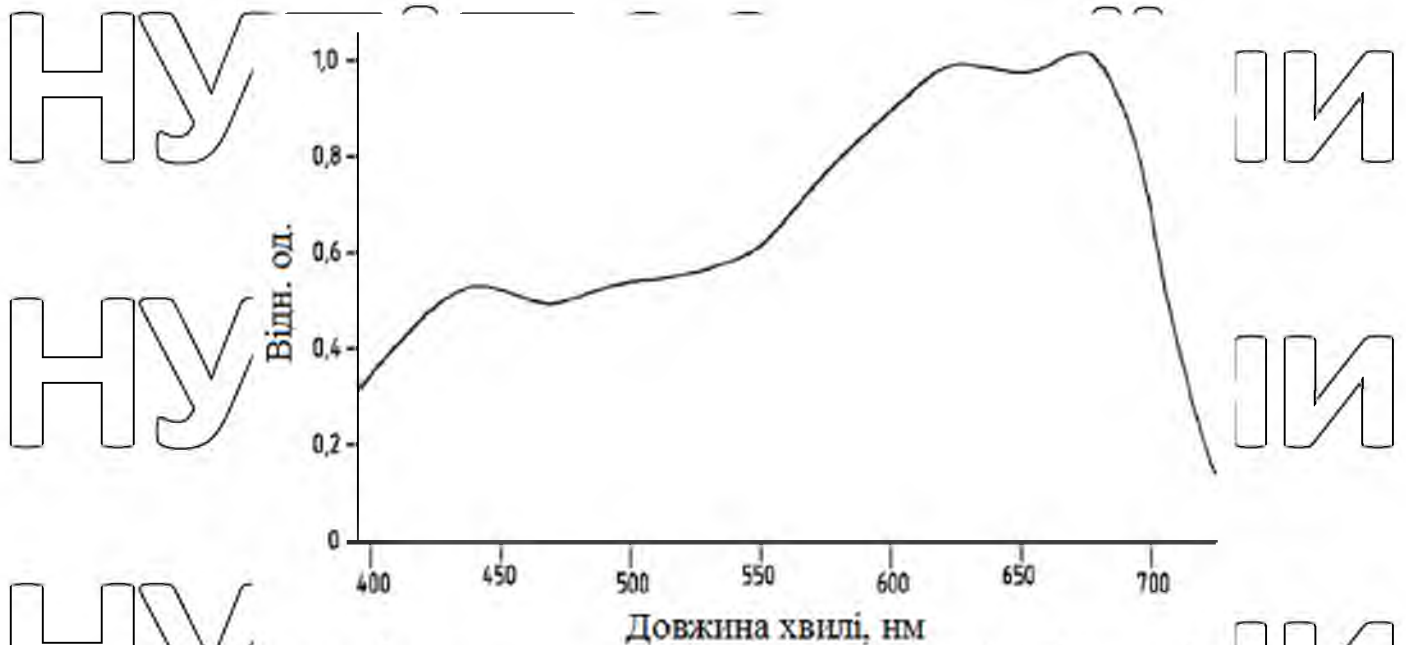


Рис. 2.3. Усереднений спектр дії фотосинтезу у зеленої рослини [McKee, 1972]

У роботі представлена на рис. 2.3 залежність представлена у вигляді рівняння, отриманого за допомогою апроксимації

$$g(\lambda) = 1,28 \cdot \cos(0,005 \cdot \lambda)^2 \cdot \cos(0,63 + \sin(2,21 \cdot (\sin(0,009 \cdot \lambda) + 0,45 \cdot \sin(0,09 \cdot \lambda))) \times \cos(0,63 + 1,66 \cdot \sin(0,009 \cdot \lambda)))^2 \cdot \cos(0,63 \cdot \lambda + 1,66 \cdot \sin(0,009 \cdot \lambda)) \quad (2.9)$$

де λ – довжина хвилі від 380 до 700 нм;

$g(\lambda)$ – функція, оснований на спектрі дійсного фотосинтезу за даними робіт Маккеї [McKee, 1972], Інада [Inada 1976, 1977].

Джерелу СВ необхідно мати спектральну характеристику, наближену до даної залежності.

Для оптимізації штучного джерела СВ повинні виконуватись 3 умови:

1. Кількість кольорів світлодіодів у світільнику повинна прямувати до одиниці.

2. Доля співпадіння спектрального розподілу джерела світла із функцією, що заснована на спектрі дії фотосинтезу, повинна прямувати до одиниці.

3. Потужність опромінення повинна знаходитись у діапазоні від 5 до 200 Вт/м² ФАР.

$$f_{\text{опромінювача}} = \frac{\int_{380}^{700} (\sum_{i=1}^n K_i \cdot \varphi_i(\lambda)) d\lambda}{\int_{380}^{700} g(\lambda) d\lambda} \quad (2.10)$$

де $f_{\text{опромінювача}}$ – доля співпадіння спектрального розподілу енергії джерела СВ із функцією, що основана на спектрі дії фотосинтезу;

$\int_{380}^{700} (\sum_{i=1}^n K_i \cdot \varphi_i(\lambda)) d\lambda$ – сумарне значення спектрального розподілу енергії джерела СВ у відносних одиницях у спектральному діапазоні ФАР;

$\int_{380}^{700} g(\lambda) d\lambda$ – сумарне значення спектрального розподілу функції, що основана на спектрі дії фотосинтезу у відносних одиницях.

Сучасні світлодіоди різних кольорів світла мають діапазон випромінювання від 370 до 1000 нм. На їх основі можна створювати системи освітлення з керованим спектральним складом випромінювання в області ФАР для рослинництва у захищеному ґрунті.

Для мінімізації кількості кольорів світлодіодів визначимо оптимальний спектр штучного джерела світла.

Розглянемо різні світлодіоди і розрахуємо їх спектральні характеристики на основі паспортних даних.

Для червоного світлодіоду за даними досліджень отримана функція спектральної щільності випромінювання (рис. 2.4).

$$\varphi_{\text{черв}}(\lambda) = 0,000492 + \frac{2,12 \cos(107\lambda) + 0,0322\lambda}{1260\lambda + 133 \cos(6,11 - 0,115\lambda) - 3,95 \cdot 10^5 - \lambda^2} - 2,16 \cdot 10^{-6} \cdot \lambda \quad (2.11)$$

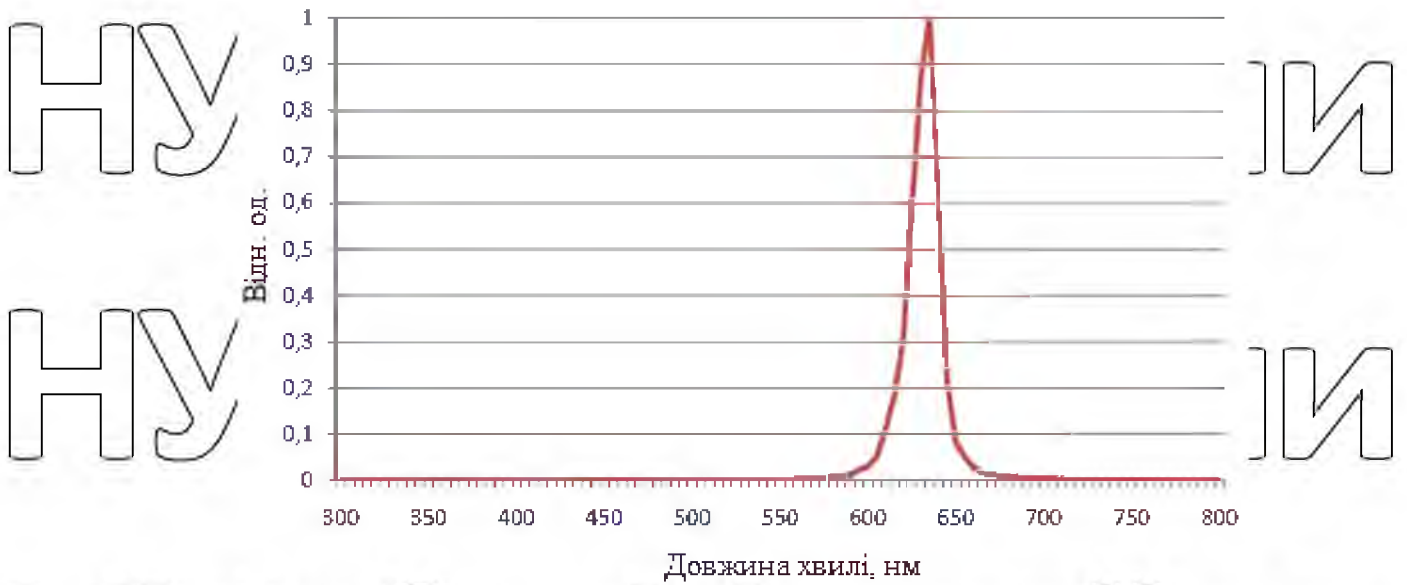


Рис. 2.4. Спектральна щільність випромінювання червоного світлодіода

Для синього світлодіода отримана така функція спектральної щільності випромінювання (рис. 2.5)

$$\varphi_{\text{синій}}(\lambda) = \frac{2,19 \cdot 10^{-8} \cdot \lambda^4}{7,74 \cdot 10^8 + 2,1 \cdot 10^4 \lambda^2 + 0,0159 \lambda^4 - 6,58 \cdot 10^6 \lambda - 29,8 \lambda^3 - 6,02 \cdot 10^{-5}} \quad (2.12)$$

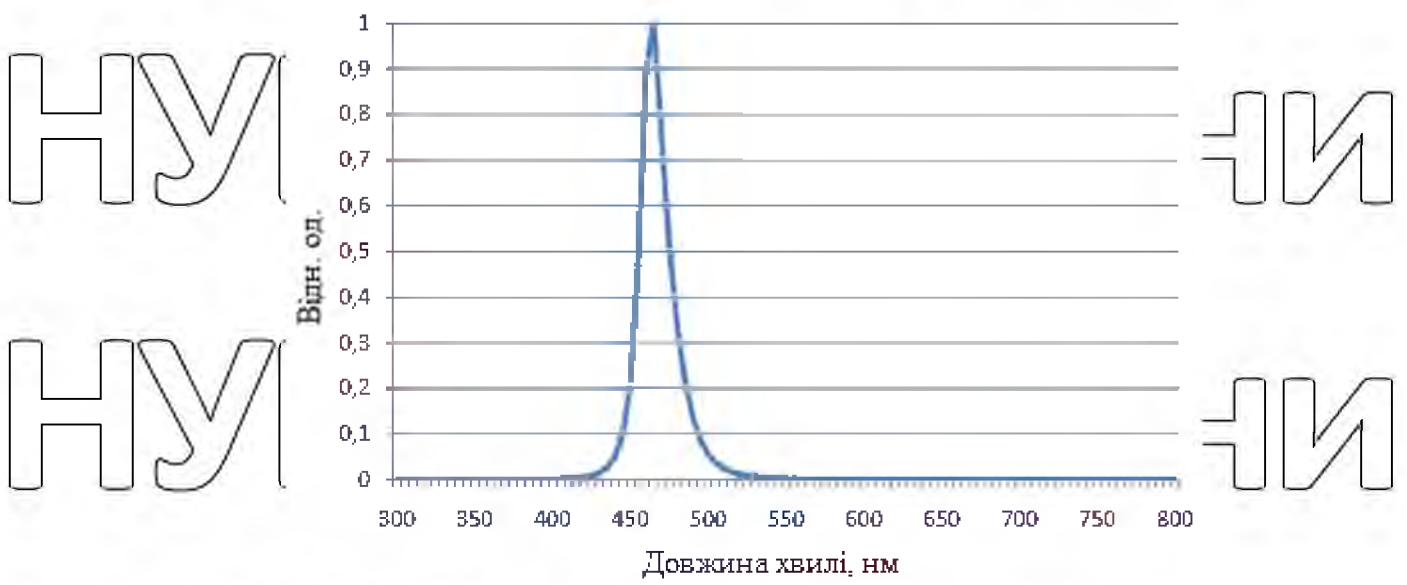


Рис. 2.5. Спектральна щільність випромінювання синього світлодіода

НУБІП України

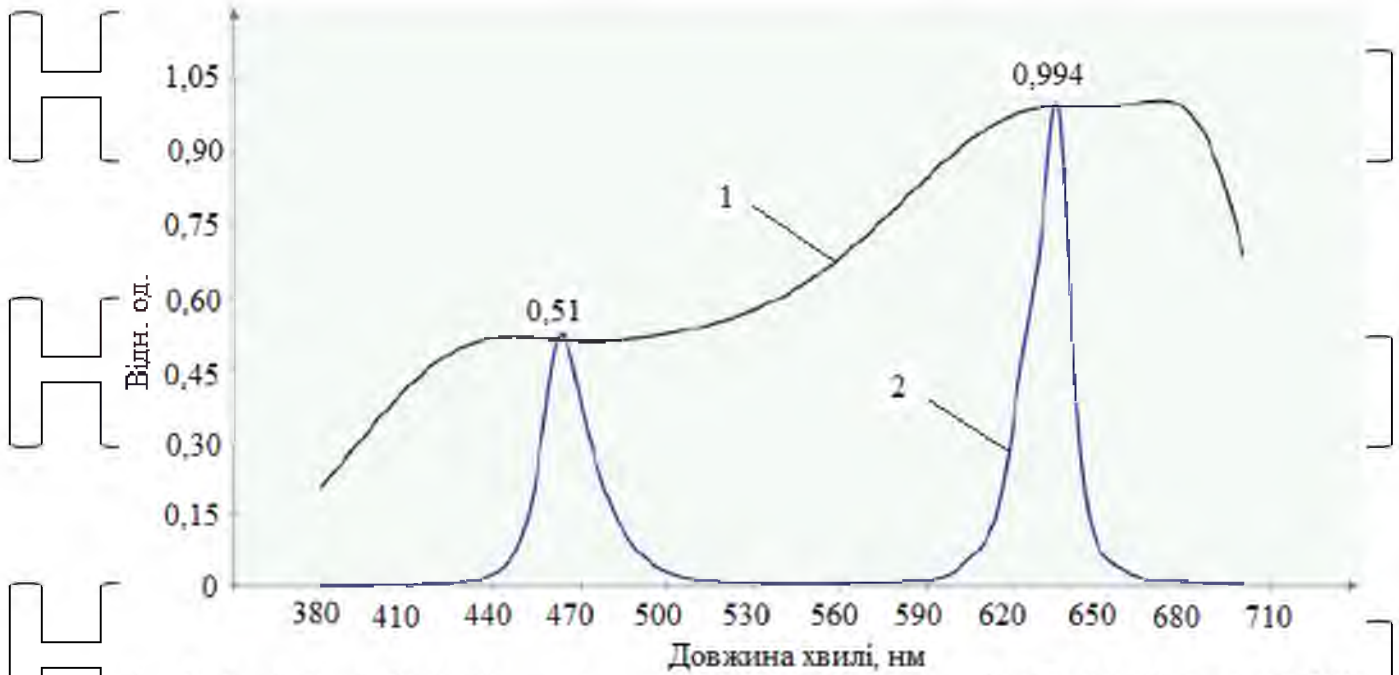


Рис. 2.6. Спектральна щільність суміщеного випромінювання синього та червоного світлодіодів (2) та функції спектру дії фотосинтезу (1)

Модель для червоного та синього отримується складанням цих двох спектрів.

$$\varphi_{\text{черв+синій}}(\lambda) = K_{\text{черв}} \cdot \varphi_{\text{черв}}(\lambda) + K_{\text{синій}} \cdot \varphi_{\text{синій}}(\lambda) \quad (2.13)$$

$$K_{\text{черв}} = g(\lambda_{\text{черв.р.}}) = 0,994 \text{ (рис. 2.6);} \quad (2.14)$$

$$K_{\text{синій}} = g(\lambda_{\text{синій.р.}}) = 0,51 \text{ (рис. 2.6).} \quad (2.15)$$

де $\lambda_{\text{черв.р.}}$ – робоча довжина хвилі червоного світлодіода;

$\lambda_{\text{синій.р.}}$ – робоча довжина хвилі синього світлодіода.

У випромінювачі, що складається із червоних і синіх світлодіодів, отримуємо слабе перекриття діапазону ФАР (рис. 2.6).

$$f_{\text{черв+синій}} = \frac{\int_{380}^{700} \varphi_{\text{черв+синій}}(\lambda) d\lambda}{\int_{380}^{700} g(\lambda) d\lambda} = \frac{34,3}{216,7} = 0,158 \quad (2.16)$$

У наш час можна використовувати світлодіоди інших кольорів, наприклад, УФ та зеленого. Для УФ світлодіода отримана функція спектральної щільності випромінювання (рис. 2.7):

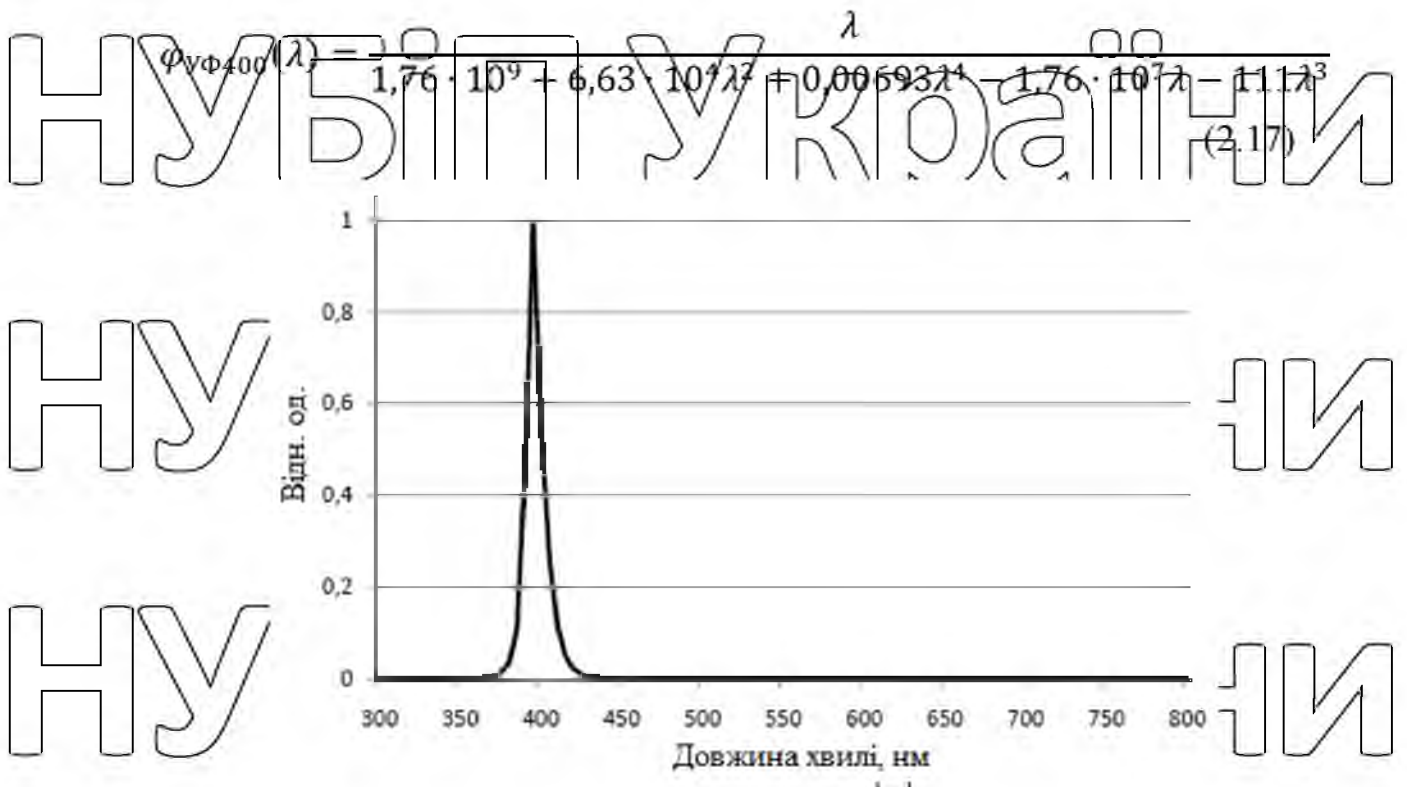


Рис. 2.7. Спектральна щільність випромінювання УФ світлодіода

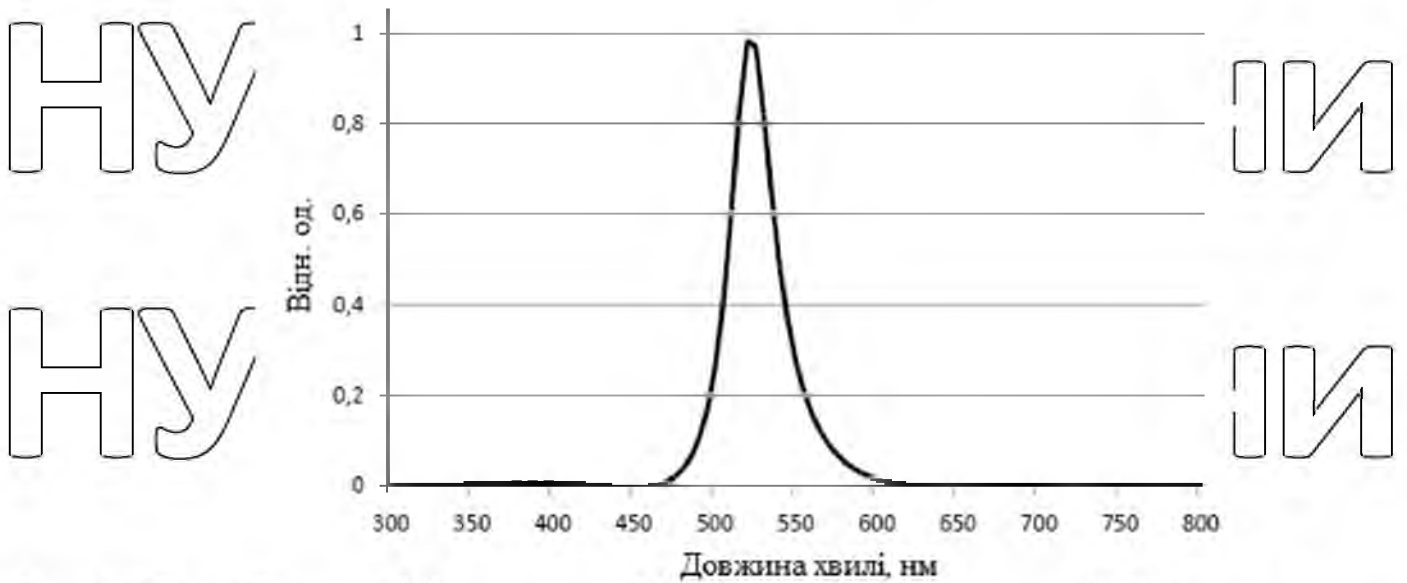


Рис. 2.8. Спектральна щільність випромінювання зеленого світлодіода

Для зеленого світлодіода отримана така функція спектральної щільності випромінювання

$$\Phi_{\text{зел}}(\lambda) = \frac{151 + 180 \sin(-0,0318 \cdot \lambda)}{2,71 \cdot 10^5 + \lambda^2 - 1,04 \cdot 10^3 \cdot \lambda - 0,00364 - 0,0048 \sin(-0,032 \cdot \lambda)}$$

(2.18)

Модель для 4-х кольорів (червоний, синій, зелений та УФ) виглядає як

$$\varphi_{\text{черв+синій+зел+УФ}}(\lambda) = K_{\text{черв}} \cdot \varphi_{\text{черв}}(\lambda) + K_{\text{синій}} \cdot \varphi_{\text{синій}}(\lambda) + K_{\text{зел}} \cdot \varphi_{\text{зел}}(\lambda) + K_{\text{УФ}} \cdot \varphi_{\text{УФ}}(\lambda) \quad (2.19)$$

$$K_{\text{черв}} = g(\lambda_{\text{черв},p}) = 0,994 \text{ (рис. 2.9);} \quad (2.20)$$

$$K_{\text{синій}} = g(\lambda_{\text{синій},p}) = 0,51 \text{ (рис. 2.9)} \quad (2.21)$$

$$K_{\text{зел}} = g(\lambda_{\text{зел},p}) = 0,55 \text{ (рис. 2.9)} \quad (2.22)$$

$$K_{\text{УФ}} = g(\lambda_{\text{УФ},p}) = 0,31 \text{ (рис. 2.9).} \quad (2.23)$$

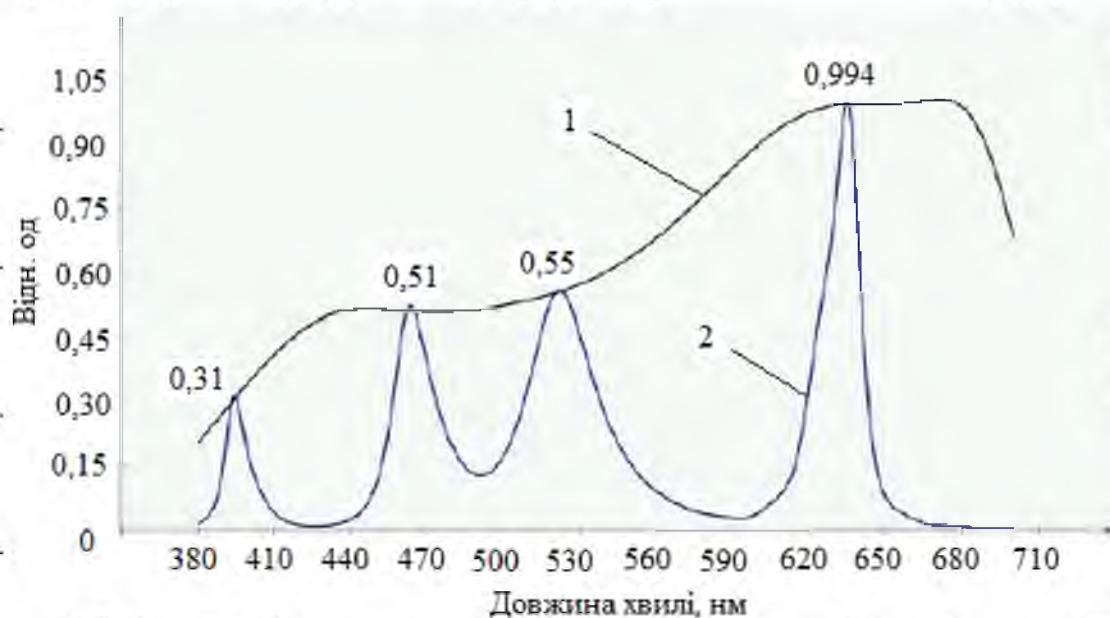


Рис. 2.9. Порівняння розрахункових спектрів сумарної дії 4-х світлодіодів (2) та функції спектру дії фотосинтезу (1)

Доля співпадіння спектрального розподілу енергії у потоці випромінювання 4-х колірних світильників із функцією, що оснований на спектрі дії фотосинтезу, є наступною

$$f_{\text{черв+синій+зел+УФ}} = \frac{\int_{380}^{700} \varphi_{\text{черв+синій+зел+УФ}}(\lambda) d\lambda}{\int_{380}^{700} g(\lambda) d\lambda} = \frac{59,956}{216,7} = 0,277 \quad (2.27)$$

Як видно із стриманого графіку, при комбінації червоного, синього, зеленого та УФ кольорів, у спектрі сумарної дії все одно наявні значні пропуски.

РОЗДІЛ 3

ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ВИРОБЛЕННЯ
САР ПАРАМЕТРІВ ОСВІТЛЕННЯ В ТЕПЛИЦІ

Проведемо порівняння найбільш розповсюджених сьогодні у тепличному виробництві ламп типу ДРЛ, ДНаТ та ламп на основі світлодіодів.

Дугові ртутні лампи (ДРЛ). Поширений сьогодні тип ламп, які використовуються у тепличному освітленні. Розроблені раніше інших ламп і найменш трудомісткі у виготовленні, лампи ДРЛ мають меншу світловіддачу в порівнянні з лампами ДНаТ, але на відміну від них не вимагають для запалення додаткових високовольтних запускаючих пристроїв.

Ергономічні показники освітлення ламп ДРЛ (коефіцієнт пульсацій світлового потоку, відповідність спектру випромінювання сонячному спектру) трохи гірші, ніж, наприклад, у ламп ДРІ, але набагато краще, ніж у ламп ДНаТ.

Дугові натрієві трубчасті лампи (ДНаТ). Сьогодні широко застосовуються для освітлення вулиць, транспортних магістралей, громадських споруд і т. д. Лампи ДНаТ мають найвищу світловіддачу серед газорозрядних ламп і менше значення зниження світлового потоку при тривалих термінах служби. Велика залежність світловіддачі і напруги запалення у ламп ДНаТ від складу і тиску внутрішнього газу, від струму, що проходить через лампу і від температури пальника ставлять дуже високі вимоги до якості виготовлення і умов експлуатації ламп ДНаТ. Тому для ефективної роботи ламп ДНаТ необхідно забезпечувати "комфортні" умови експлуатації — високу стабільність напруги живлення, температуру довкілля від -20°C до $+30^{\circ}\text{C}$. Відхилення від "комфортних" умов експлуатації призводить до різкого скорочення терміну служби ламп і зменшення світловіддачі. На термін служби ламп ДНаТ також впливає якість використовуваних імпульсних запускаючих пристроїв. Нині існує широко

поширена помилка, що заміна ламп ДРЛ на ефективніші лампи ДНаТ призводить до поліпшення якості освітлення і економії електроенергії. При цьому не враховується, що лампа ДНаТ аналогічної потужності при більшому світловому потоці має і більший споживаний струм.

Лампи на основі світлодіодів. Самі по собі світлодіоди використовуються досить давно, в основному для індикації. Випромінювання світла світлодіодом шляхом рекомбінації фотонів в області р - n переходу напівпровідника при проходженні струму. Прорив в області світлодіодів, що стався кілька років тому, був пов'язаний в першу чергу з отриманням нових напівпровідникових матеріалів, що підвищують яскравість світлодіодів більш ніж в 20 разів. На відміну від інших технологій у світлодіодів дуже високе ККД – не менше 90%. У більшості існуючих технологій присутнє розігрівання якого-небудь тіла або області, на що вимагається пристойні витрати енергії.

Завдяки високому ККД світлодіодна технологія забезпечує низьке енергоспоживання і мале тепловиділення. Окрім цього, в силу самої природи отримання випромінювання, світлодіоди мають сукупність характеристик, недосяжних для інших технологій. Механічна і температурна стійкість, стійкість до перепадів напруги, тривалий термін служби, відмінна контрастність і перенесення кольорів. Плюс екологічність, відсутність мерехтіння і рівне світло.

Таблиця 3.1. Параметри ламп для порівняння

	Тип	Номинальна потужність, Вт	Споживана потужність, Вт	Ресурс роботи, год.
ДРЛ	ДРЛ-125	125	130	10000
	ДРЛ-250	250	290	10000
	ДРЛ-400	400	460	12000
ДНаТ	ДНаТ-100	100	130	5000
	ДНаТ-150	150	200	9000
	ДНаТ-250	250	320	13000
Лампа на основі світлодіодів ССВ-003	Аналоги: ДРЛ-250, ДНаТ-150	72	72	55000

Таблиця 3.2. Порівняльна характеристика ламп

Тип лампи	ДРЛ-250	ДНаТ-150	Світлодіодна ССВ-003
Світловий потік, Лм	10000	12000	7200*
Споживання, Вт	290	200	72
Ресурс роботи, год.	10000	9000	55000
Контрастність і передача кольору	Слабка	Дуже слабка	Відмінна
Механічна стійкість	Середня	Середня	Відмінна
Температурна стійкість**	Слабка	Дуже слабка	Відмінна
Час виходу в робочий режим	10-15 хв.	10-15 хв.	Миттєво
Екологічна безпечність	Дуже шкідлива, містить до 100 мг парів ртуті	Дуже шкідлива, містить натрієво-ртутну амальгаму і ксенон	Абсолютно безпечна

*У світлодіодній лампі може здивувати світловий потік в 7 000 люмен. Насправді його цілком вистачає, зважаючи на сильну спрямованість світлового потоку (наприклад за допомогою додаткової оптики, яка дозволяє отримати максимальну рівномірність освітлення на заданій території). При використанні усередині приміщень, де важливе розсіювання світла, цей чинник впливає набагато менше, ніж в зовнішньому, де висота підвісу зазвичай складає від 6 м і вище. Експериментальне порівняння типів ламп може це наочно продемонструвати.

** Під температурною стійкістю мається на увазі те, наскільки залежить як робота лампи, так і термін її служби від критичних значень температури. Наприклад, лампа ДНаТ дуже чутлива до відхилення від «комфортних» значень температури. Такі відхилення негативно впливають на світловіддачу і призводять до різкого зниження терміну служби.

Важливо позначити ще один момент, про який не сказано вище. У лампах ДРЛ і ДНаТ присутній ефект старіння. Достовірно відомо [6], що після 400 годин роботи падіння світлового потоку ламп ДРЛ складає більше 20% а до кінця терміну служби більше 50%. Більшу частину терміну служби лампа випромінює усього 50-60% номінального світлового потоку. З лампами ДНаТ ситуація дещо гірша, зважаючи на їх меншу температурну стійкість. У світлодіодів подібного немає. Світлодіоди впродовж усього терміну служби зберігають свої параметри на первинному рівні. Лише до кінця терміну може спостерігатися незначне падіння. Виходить, що якщо на лампах типу ДРЛ і ДНаТ проводити заміри світлових параметрів, наприклад, кожен місяць впродовж усього терміну служби, а потім вичислити середнє, то воно складатиме порядку 60% номіналу, і заявлені значення параметрів торкаються

лише початкового періоду експлуатації і постійно падатимуть по кривій від самого початку.

Ефективність використання вказаних типів світильників.

ДРЛ. Найбільш проста і доступна за ціною технологія. Низькі початкові витрати за умови відсутності жорстких вимог до освітлення виправдовують її використання.

ДНаТ. Краща світловіддача серед газорозрядних ламп – єдина серйозна перевага перед ДРЛ. Але дуже слабкий показник перенесення кольорів і велика чутливість до температури ставить під сумнів доцільність заміни.

Світлодіодний. Може здатися неймовірним, але у світлодіодних ламп немає технічних недоліків. До сказаного вище можна додати, що світлодіодним лампам не потрібні пускові струми, а значить для монтажу використовується кабель меншого перерізу, що відповідно зменшує його вартість. Єдиний мінус це те, що в ціні вони дорожчі. З урахуванням усіх чинників, що стосуються витрат експлуатації ламп ДРЛ або ДНаТ, термін окупності світлодіодних аналогів приблизно 3 роки. Тобто за 3 роки світлодіодна лампа окупає себе, а усі подальші роки приносить прибуток. При цьому увесь час видаючи найякісніше світло в порівнянні з іншими

технологіями. *Світлоодиоди і КЗ.* На світлодіод як на такий подавати напругу не можна через його вольт-амперну характеристику, світлодіод "керується" струмом. Найпростіший спосіб – через резистор. У світильнику для подання струму на світлодіодний ланцюг передбачений так званий драйвер. Драйвер не лише виступає в ролі перетворювача (адаптера), але також оберігає світлоодиоди від КЗ. У разі КЗ удар на себе приймає саме драйвер.

Вартість електроенергії, в залежності від пори доби (вечірній та нічний час) і пікового періоду становить від 0,3 грн./кВт до 1,21 грн./кВт. Середнє значення ціни протягом року (зимовий і літній періоди) - 0,75 грн./кВт.

Робота світильника – 12 год./добу.

Таблиця 3.3. Результати порівняльного аналізу (на 1 світильник)

Тип лампи	ДРЛ-250	ДНаТ-150	Світлодіодна ССВ-003
Споживана потужність, кВт/год.	290	200	72
Споживана потужність, кВт/доба	3,48	2,4	0,86
Споживана потужність, кВт/міс.	107,88	74,4	26,66
Споживана потужність, кВт/рік	1294,56	892,8	319,9
Вартість електроенергії, грн./рік	970,92	669,6	240

Отже, економія тільки на споживанні електроенергії на одному світильнику у порівнянні із лампою ДРЛ складає 731 грн./рік, у порівнянні з ДНаТ – 430 грн./рік.

Ресурс роботи світлодіодного світильника 55000 год., що при роботі 12 год./добу становить 12 років. Ресурс роботи ламп ДРЛ та ДНаТ – 10000 год. (2 роки), тобто протягом 12 років їх необхідно замінити як мінімум 6 разів, що спричиняє додаткові витрати на утилізацію.

ЛІТЕРАТУРА

- 1 Бахарев И., Прокофьев А., Туркин А., Яковлев А. Применение светодиодных светильников для освещения теплиц реальность и перспективы. *Современные технологии автоматизации*. 2010. № 10. С. 76–82.
- 2 ВНГП АПК-19-07. Теплиці і оранжерейні Підприємства. Споруди захищеного ґрунту для фермерських (селянських) господарств: Відомчі норми технологічного проектування. [Чинний від 2007-08-01]. Вид. офіц. Київ: М-во аграр. політ. України, 2007. – 140 с.
- 3 Вовна О.В., Лактіонов І.С., Лебедєв В.А. Комп'ютерно-інтегрований моніторинг та керування в промислових теплицях: поточні результати і перспективи досліджень. монографія. Покровськ: ДВНЗ «ДонНТУ», 2020. – 255 с.
- 4 ГОСТ Р 8.749-2011. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Светодиоды. Методы измерения фотометрических характеристик. [Чинний від 2011-12-15]. Издание официальное. Москва: Стандартинформ, 2019. 16 с.
- 5 Гуревич М.М. Фотометрия (теория, методы и приборы). 2-е изд., пер. и доп. Л.: Энергоатомиздат, 2009. – 272 с.
- 6 Живописцев Е.Н., Косицын О.А. Электротехнология и электрическое освещение. – М.: Агропромиздат. – 1990. – 303 с.
- 7 Жилинский Ю.М., Кумин В.Д. Электрическое освещение и облучение. – М., Колос, 1982. – 268 с.
- 8 Лаврус В.С. Свет и тепло. К.: Нит, 1997. – 75 с.
- 9 НТП 10-95. Нормы технологического проектирования теплиц и тепличных комбинатов для выращивания овощей и рассады: Ведомственные нормы технологического проектирования. [Чинний від 1996-07-01]. Вид. офіц. М.: Минсельхозпрод, 1996. – 87 с.
- 10 Протасова Н.Н., Уеллс Дж. М., Добровольский М.В., Цоглин Л.Н. Спектральные характеристики источников света и особенности роста растений в условиях искусственного освещения // Физиология растений. – 1990. – Т. 37. – вып. 2. – С. 386–396.
- 11 Светодиоды. Ф.Е. Шуберт, Москва, ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 488 с.
- 12 Светодиоды и их применение для освещения. Под общ. ред. акад. АЭН РФ Ю.Б. Айзенберга. – М.: Знак, 2012. – 280 с.
- 13 Справочная книга по светотехнике / Под ред. Ю.Б. Айзенберга. М.: Знак, 2006. – 972 с.
- 14 Тихомиров А.А., Шарунин В.П., Лисовский Г.М. Светокультура растений: Биофизические и биотехнологические основы. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. – 213 с.

15 Энциклопедия об электричестве: Светодиодные лампы как основное освещение: оценка экономичности, преимущества и недостатки, разновидности.
Электронный ресурс. Режим доступа: <https://elektrik-a.su/master-klassy/svetodiodnye-lampy-kak-osnovnoe-osveshhenie-296>

16 Bet Lux Electronics: Bullet Type LED lamp.
Электронный ресурс. Режим доступа: <http://betlux.com/>

17 Промислові теплиці типу «Venlo»
Электронный ресурс. Режим доступа: <https://www.agrotechnical.net.ua/uk/industrial-greenhouses-of-the-venlo-type/>

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України