

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

02.01 – МР 175 «С» 2021 01.02.21 021. ПЗ

НУБІП України

СІРЯЧЕНКО МАКСИМ СЕРГІЙОВИЧ

НУБІП України

2021

НУБІП України

НУБІП України

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

УДК 621.3:631.24(477.81)

ПОГОДЖЕНО
Директор ННІ енергетики,
автоматики і енергозбереження

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ
Завідувач кафедри
електротехніки, електромеханіки та
електротехнологій

Жильцов А.В.

Каплун В.В.

(підпис)

(підпис)

« »

2021 р.

« » 2021 р.

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

на тему: «**Обґрунтування і розробка показників та режимів
нормування штучного опромінення рослин в теплицях**»

Спеціальність 141 електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Освітня програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Магістерська програма / Енергоінжиніринг / Електротехніка та
електротехнології /

Орієнтація освітньої програми освітньо-професійна

Керівник магістерської роботи

д.т.н., проф

(науковий ступінь та вчене звання)

Червінський Л. С.

(підпис)

(ПІБ)

Виконав

Сіряченко М.С.

(підпис)

(ПІБ)

Нормоконтроль к.т.н.

(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Усенко С.М.

(ПІБ)

Консультант к.т.н., доцент

(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Чуєнко Р.М.

(ПІБ)

КИЇВ – 2021

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка виконана на 104 листах друкованого тексту і містить 17 таблиць, 21 риєунок. При виконанні роботи було використано 34 літературних джерела.

Актуальність теми: В сучасних аграрних технологіях велику увагу приділяють підвищенню кількості і якості сільськогосподарської продукції. В основу магістерської роботи покладено сучасні інженерні методи розрахунку і вибору електрифікованих фотосинтезних установок в спорудах захищеного ґрунту.

Метою дослідження є обґрунтування і розробка показників та режимів нормування штучного опромінення рослин в теплицях для забезпечення підвищення ефективності технологічних процесів, збільшення продуктивності праці, зменшення собівартості та енергоємності продукції.

Об'єктом дослідження є показники та режими нормування штучного опромінення рослин в теплицях

Предметом досліджень є характеристики та параметри відповідних опромінювальних установок.

Теоретична цінність отриманих результатів полягає в обґрунтуванні структури та параметрів системи електричного обладнання теплиці та системи автоматичного керування опроміненням рослин.

Практична цінність отриманих результатів полягає у розробці системи електрообладнання та опромінення теплиці.

На захист кваліфікаційної магістерської роботи виносяться:

1. Система технологічного обладнання теплиці.
2. Система опромінення та освітлення теплиці.

3. Результати досліджень системи автоматичного керування опроміненням теплиці.

4. Результати розрахунку чергового освітлення теплиці в програмі DIALux 4.7.

Робота пройшла апробацію на науково-технічних семінарах кафедри електротехніки, електромеханіки та електротехнологій

Ключові слова. Опромінення рослин, теплиці, методика розрахунку, норми ефективного опромінення , фотосинтез.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУВБІП УКРАЇНИ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ФАР – фотосинтезно активна радіація

БТС – біотехнічна система;

НУВБІП УКРАЇНИ

ЕТК – електротехнологічний комплекс

ОВ – оптичне випромінювання

Фіт/м² – одиниця вимірювання фотосинтезно активної радіації

НУВБІП УКРАЇНИ

LED – світлодіодний випромінювач

ДРЛ – дугова ртутна газорозрядна лампа високого тиску

ДНАТ - дугова натрієва газорозрядна дамба високого тиску

НУВБІП УКРАЇНИ

УФ – ультрафіолетове випромінювання оптичного діапазону

ВВ – видиме випромінювання оптичного діапазону.

ІЧ – інфрачервоне випромінювання оптичного діапазону

НУВБІП УКРАЇНИ

ФС – фотосинтезний процес

НУВБІП УКРАЇНИ

НУВБІП УКРАЇНИ

ЗМІСТ

ВСТУП	8
1. Аналіз досліджень впливу оптичного випромінювання на розвиток рослин в захищеному ґрунті	10.
1.1. Аналіз шляхів підвищення фотосинтезної продуктивності в теплицях	10
1.2. Аналіз спектрів дії оптичного випромінювання на ріст рослин	13
2. Теоретичні дослідження та обґрунтування характеристик фотосинтезної дії оптичного випромінювання та методик їх вимірювання	18
2.1. Дослідження фотосинтезної дії оптичного випромінювання	18
2.2. Визначення показників випромінювання, з якими повинна узгоджуватися температура культиваційного приміщення з метою найбільш повного використання енергії на фотосинтез	21
2.3. Методики вимірювання спектральних оптичних характеристик досліджуваних об'єктів	26
3. Розробка методики оцінки фотосинтезної ефективності джерела оптичного випромінювання для світлокультури рослин	32
3.1. Визначення показників впливу енергії оптичного випромінювання на розвиток рослин	32
3.3. Розробка математичної моделі визначення фактичної фітоопроміненості в теплиці	39
4. Розробка і дослідження математичної моделі узгодження спектру випромінювання джерела зі спектром фотосинтезної дії	66.
5. Висновки та пропозиції по магістерській роботі	76
Список використаної літератури	77

ВСТУП

Овочівництво закритого ґрунту має важливе значення для забезпечення населення свіжими овочами протягом року і для виробництва розсади для відкритого ґрунту.

Тепличне овочівництво є найбільш енергоємною галуззю сільськогосподарського виробництва. Техніко-економічні показники виробництва тепличних овочів у нас нижчі від сучасного світового рівня. Якість овочів із закритого ґрунту часто не відповідає сучасним вимогам споживання екологічно чистої продукції через великі дози пестицидів і недосконалість системи мінерального живлення.

Розвиток технологій вирощування рослин протягом всього року має велике значення в народному господарстві і значні перспективи. При інтенсивних технологіях вирощування рослин в теплицях можна отримати до шести врожаїв, але такий процес значно дорожчий, тому його застосування має сенс лише при виведенні в короткі строки нових сортів в науково-дослідницьких інститутах.

Аналіз стану технологічних процесів при вирощуванні розсади овочевих культур в культиваційних спорудах сучасних сільськогосподарських підприємств свідчить про недостатній рівень автоматизації виробничих процесів. Значна частина робіт виконується вручну. Внаслідок цього має місце висока собівартість кінцевого продукту, важкі умови праці, низька заробітна плата. Крім цього, культиваційні споруди для вирощування розсади споживають значну електричну потужність, тому економія електроенергії в теплицях має важливе значення не лише для зниження собівартості продукції, а й для збереження енергоресурсів та зменшення перевантажень електричних мереж.

Значне покращення стану в галузі вирощування розсади протягом року можна досягти відмовою від застарілих технологій і заміною їх новими, відповідно з останніми досягненнями науково-технічного прогресу, із

застосуванням найновішого технічного обладнання, що забезпечить високий рівень електрифікації та автоматизації виробничого процесу. Сучасний розвиток техніки дозволяє майже повністю виключити участь людини у технологічних процесах, а комп'ютерна техніка і спеціалізоване програмне забезпечення дає змогу підібрати оптимальні параметри з урахуванням усіх

необхідних виробничих умов з мінімальною затратою часу. До того ж вартість технічних засобів швидко знижується внаслідок стрімкого розвитку технологій, що відкриває перспективи для застосування сучасного

обладнання. Це дозволяє звільнити додаткову робочу силу для виконання інших виробничих операцій, скоротити участь людини у виробництві, підвищити надійність та продуктивність виробництва і, як наслідок, знизити собівартість продукції.

Все вищесказане зумовлює необхідність модернізації системи автоматичного регулювання освітлення та опромінення теплиці, що дасть змогу повністю автоматизувати виробничий процес вирощування рослин, знизити собівартість отриманої продукції і полегшити людську працю.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

РОЗДІЛ 1.

НАУБІП УКРАЇНИ

АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ВПЛИВУ ОПТИЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НА РОЗВИТОК РОСЛИН В ЗАХИЩЕНОМУ ГРУНТІ

Низький рівень природної освітленості в теплицях і короткий зимовий день потребує додаткового опромінення, та штучного підтримання температурного режиму і вологості, за рахунок значних витрат не відновлюваної енергії. Так, біля половини собівартості тепличної продукції припадає на спожиту електроенергію.

Тому застосування нових високо ефективних енергоощадних фотосинтезних джерел та обґрунтування режимів штучного опромінення, на основі дослідження впливу цих джерел на розвиток і продуктивність тепличних культур, є одним з найперспективніших шляхів підвищення якості і продуктивності в спорудах закритого ґрунту.

1.1. Аналіз шляхів підвищення фотосинтезної продуктивності в теплицях.

Існує два напрямки застосування електроопромінювальних установок в рослинництві захищеного ґрунту:

- для подовження природного світлового дня (доопромінювання);
- для світло культури: вирощування тепличних рослин лише під штучними джерелами оптичного випромінювання.

Відомими вченим в області електрифікації сільськогосподарського виробництва, зокрема рослинництва Л.К. Алфьоровою, В.А. Андрійчуком, В.Н. Карповим, Б.М. Ковалишиним, О.О. Нічипоровичем, Н.Н. Протасовою, В.М.Малищевим, А.А. Смердовим, І.І. Свенціцьким, А.К. Лямповим, Ю.М. Жилінським, В.М. Леманом, Г.С. Саричевим, А.А. Тихомировим, А.П. Примаком, С.А. Овчуковою, А.П. Коломійцем, І.Н. Козирєвою, В.А. Козинським, Л.С. Червінським, R. McCree, P. Mekkel, B. Singh, M. Fischer, J. Bonnet, P. Harris і

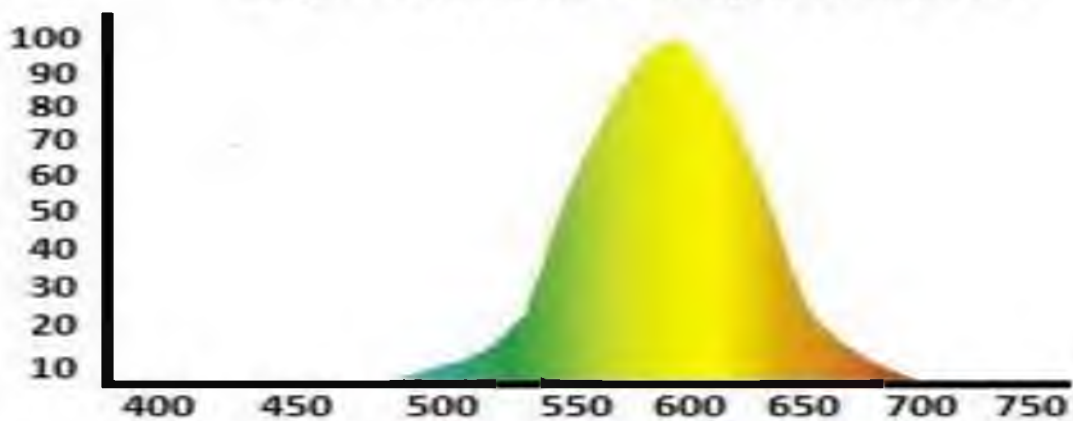
іншими доведена ефективність застосування оптичного випромінювання для отримання додаткової рослинницької продукції.

Встановлено, що економічно вигідно опромінювати зокрема розсаду.

Період вегетації у розсади 25 ... 50 днів і опроміненню піддають відразу велику кількість рослин. При цьому продукцію одержують на 20 ... 30 днів раніше і врожайність розсадних культур підвищується на 20 ... 25% [155].

У рослин є системи фоторецепторів, що забезпечують поглинання енергії то всій області ФАР (фотосинтезно активна радіація). Вони є єдиними організмами на Землі, які самостійно синтезують органічні речовини з неорганічних. Цей процес носить назву фотосинтезу. (Див. рис. 1.1)

Сприйняття світла людським оком



Сприймання світла рослинами

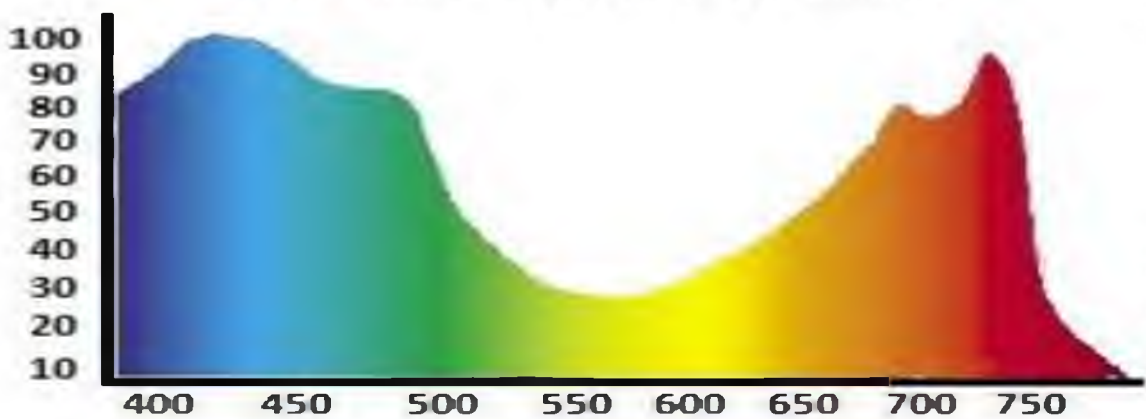
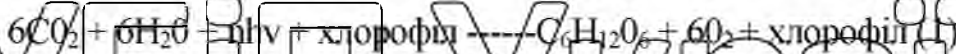


Рис. 1

Фотосинтез органічних речовин в рослинах є основою їх розвитку і життєдіяльності. Роль хлорофілу у фотосинтезі вперше визначив К. А. Тімірязєв, показавши, що хлорофіл, поглинаючи енергію випромінювання, бере активну участь в окисно-відновній реакції, в результаті якої з води і вуглекислого газу утворюється органічна речовина і вільний кисень:



У рослин за поглинання світла відповідають спеціальні пігменти, які розміщені в тілакоїдах хлоропластів (Рис.1.2)



Рис. 1.2. Схема поглинання фотонів світла пігментами реакційних центрів тілакоїдів

. Основні з них - хлорофіли а і b і каротиноїди. Хлорофіли поглинають світло синього і червоного діапазонів, а каротиноїди - синього діапазону.

На рис.1.3 показана сучасна схема поглинання і перетворення енергії фотонів в реакційних центрах фотосинтеза.

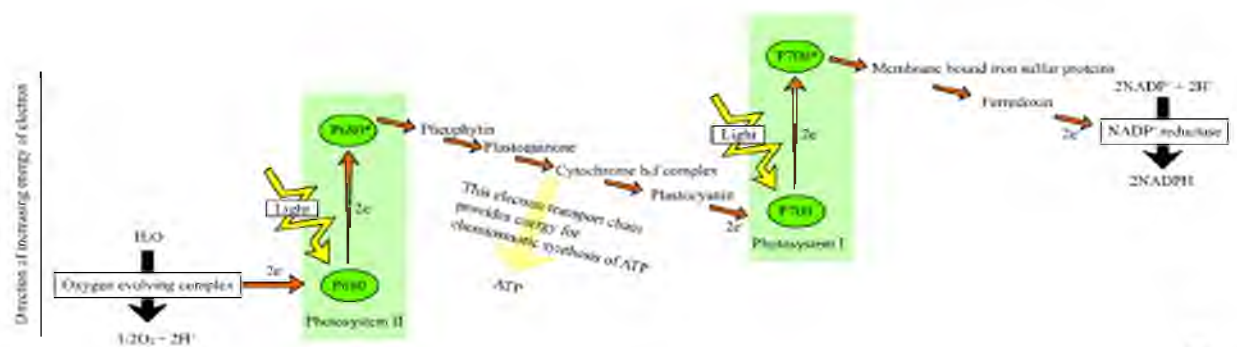


Рис.1.3. Схема перерозподію оптичної енергії в процесі фотосинтезу.

Світло, отримане різними пігментами, витрачається на різні цілі: пігменти з піком чутливості в червоній області спектра відповідають за розвиток кореневої системи, дозрівання плодів, цвітіння рослин; пігменти з піком поглинання в синій області відповідають за збільшення зеленої маси; зелена частина спектра випромінювання корисна для фотосинтезу щільних листя і листя нижніх ярусів, куди сині та червоні промені майже не проникають.

1.2. Аналіз спектрів дії оптичного випромінювання на ріст рослин.

Аналіз спеціальної літератури показує, що рослинний покрив на Землі засвоює лише близько 0,2% енергії фотосинтетично активної радіації, що поступає на Землю від Сонця. Разом з цим теоретично можливо засвоїти 5% і навіть 10% сонячної енергії. За даними Нічипоровича А.А. максимальний к.к.д. фотосинтезу (але не більше 5%) має місце при випромінюванні з довжиною хвилі 680 нм [184].

Основна причина низької продуктивності біосфери як біорегенеративної системи, полягає в тому, що величезна частина падаючої енергії ФАР знецінюється як фактор фотосинтезу сприятливим поєднаннями її з іншими умовами навколишнього середовища: теплом, вологістю, умовами ґрунтового родючості.

Крім того, встановлено, що при вирощуванні рослин на штучному світлі необхідно знати, яким має бути спектральний склад випромінювання, тому, що він значно впливає на врожай сільськогосподарських культур [79, 180].

Відомий спектр фотосинтезної дії оптичного випромінювання приведено на рис.1.4.

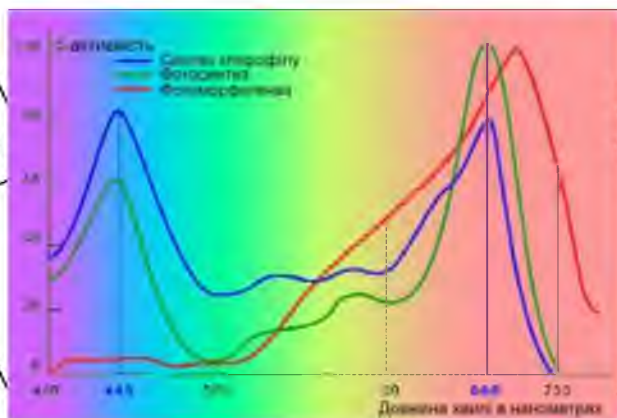


Рис. 1.4.

Системні проведені дослідження вченими різних країн показують, що спектр фотосинтезної дії є

узагальнюючим для всіх рослин, але різні частини спектру випромінювання по-різному впливають на їх розвиток.

За даними Протасової М.М. різні частини спектра спричиняють характерний лише їм вплив на рослини [216, 217]. Відсутність в випромінюванні ламп окремих ділянок спектра може призвести до порушення нормального росту рослин при тривалому вирощуванні їх під цими джерелами (табл. 1.1).

Таблиця 1.1.

Вплив спектра випромінювання на формування рослин (за Протасовою Н.Н.)

Діапазон довжин хвиль, нм	Вплив на рослини
400 ... 500 (синє світло)	Формування низкорослих рослин з низкою продуктивністю внаслідок накопичення в листі інгібіторів росту. При цьому стебла вкорочені, листки потовщені, але дрібні.
500 ... 600 (зелене світло)	Формування рослин з витягнутими осьовими органами і тонкими листям, з низкою продуктивністю
600 ... 780 (червоне світло) особливо важлива зона 640 ... 680	Формування у рослин високого ростового ефекту (інтенсивний ріст листя, осьових органів). При недостатці цього випромінювання у рослин формуються неповноцінні генеративні органи, що призводить до низької врожайності.

Дослідження ряду інших авторів дозволяють зробити наступні узагальнюючі висновки [216, 217]:

Спектральні діапазони оптичного випромінювання від штучних джерел світла мають такі фізіологічні значення:

- 280-320 нм, має негативний вплив на рослину;
- 320-400 нм, спричиняє регуляторну дію при незначному співвідношенні в загальному спектрі;

• 400-500 нм («синій»), необхідний для протікання фотосинтезу і регуляції розвитку;

• 500-600 нм («зелений»), корисний для фотосинтезу оптично щільного листя, листя нижніх ярусів, густих посівів рослин завдяки високій проникаючій здатності між рослинами;

• 600-700 нм («червоний»), спричиняє яскраво виражену дію на фотосинтез, розвиток і регуляцію біологічних процесів;

• 700-750 нм («дальній червоний»), має яскраво виражену регуляторну дію, при малій кількості відсотків в загальному спектрі.

• 1200-1600 нм, є позитивним випромінюванням при малій інтенсивності (поглинається внутрішньо-і міжклітинної водою, збільшує швидкість теплових біохімічних реакцій).

Аналогічну думку висловлює Малишев В.В. [161 ... 164]. Він пропонує в основу аналізу відносного спектрального розподілу джерела випромінювання покласти модель, в якій будь-яке випромінювання з суцільним або лінійчатим спектром області ФАР представляється складним і складається з трьох квазімонохроматичних випромінювань за кількістю спектральних ділянок, на яких вони зосереджені. Відносний спектральний розподіл випромінювання оцінюється поєднанням усереднених відносних енергій випромінювання в процентах щодо загального випромінювання ФАР.

Наприклад, рекомендується співвідношення ділянок спектру 30% - 50% - 20%, тобто для випромінювання з довжиною хвилі 380 ... 500 нм усереднена відносна енергія становить 30%, для зеленої ділянки спектру 500 ... 600 нм

відносна енергія становить 50%, а для червоної частини спектру 600 ... 720 нм, відповідно - 20%.

Таким чином, кожна з трьох основних областей ФАР взята окремо, не дозволяє виростити повноцінні рослини, і тільки випромінювання з певним співвідношенням енергії по вище наведеним трьом діапазонам довжин хвиль може забезпечити вирощування повноцінних рослин.

На думку Протасової Н.Н. доцільно створити таке джерело випромінювання, у якого співвідношення потоків по спектру ФАР буде наступним: 380 ... 490 нм - 20 ... 25%; 490 ... 500 нм - 20 ... 25%; 600 ... 700 нм - 60 ... 50%.

В результаті аналізу досліджень встановлено, оптимальний склад випромінювання має наступне співвідношення енергії по спектру: 30% - у синій області (380-490 нм), 20% - в зеленій (490-590 нм) і 50% - в червоній області (600-700 нм). З використанням такого штучного освітлення отримані врожаї, в кілька разів вищі, ніж при звичайному освітленні, причому за більш короткі (в 1,5-2 рази) строки.

В багатьох дослідженнях звертається увага на те, що слід враховувати і генетично закладені природні особливості росту рослин під випромінюванням Сонця. Протягом дня спектральна щільність сонячного випромінювання змінюється: При зниженні Сонця до горизонту сонячний спектр збагачується довгохвильовим оранжево-червоним випромінюванням, а при знаходженні Сонця в зеніті - максимум випромінювання приходить на короткохвильові синьо-фіолетові промені. Аналіз спеціальної літератури показує, що сонячне світло (інтенсивність випромінювання, тривалість впливу протягом доби, сезонність року, висота стояння Сонця над горизонтом) мають величезний вплив на тривалість вегетації рослин [20].

Дослідження показали, що синє світло сприяє швидкому розвитку південних «короткоденних» рослин, наприклад. Синє світло збільшує листову поверхню, сприяє більш інтенсивному приросту сухої речовини. Д «Довгоденні»

рослини більш вимогливі до червоного кольору, а синє світло навіть затримує їх розвиток [21].

Таким чином, штучно впливаючи на рослини різним за спектральним складом випромінюванням і величиною опромінення, можна подовжувати або скорочувати його вегетаційний період [19]. Завдяки зменшенню вегетаційного періоду можна значно скоротити витрати на теплову і електричну енергію при вирощуванні рослин в захищеному ґрунті. Тому доцільно проводити дослідження по визначенню найоптимальніших значень спектру і інтенсивності опромінення для кожної конкретної культури захищеного ґрунту.

Таким чином, роботи видатних фізіологів в галузі світлокультури рослин свідчать, що інтенсивність фотосинтезу залежить від ряду факторів, у тому числі і від спектральної щільності випромінювання, рівня опромінення. Разом з цим спеціально підібраний спектральний склад випромінювання може впливати на тривалість вегетаційного періоду у культур захищеного ґрунту. Зменшення тривалості вегетаційного періоду дозволить значно знизити енерговитрати на вирощування культури.

НУБІП України

НУБІП України

РОЗДІЛ 2.

ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОБГРУНТУВАННЯ

ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОСИНТЕЗНОЇ ДІЇ ОПТИЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ТА МЕТОДИК ЇХ ВИМІРЮВАННЯ

2.1. Дослідження фотосинтезної дії оптичного випромінювання

Фотосинтез органічних речовин з неорганічних в рослинах є основою їх розвитку і життєдіяльності. К. А. Тімірязєв, вперше показав, що в процесі фотосинтезу істотну роль грає хлорофіл, який, поглинаючи оптичну енергію випромінювання, бере активну участь в окисно-відновних реакціях. Завдяки цьому з води і вуглекислого газу утворюється органічна речовина і вільний кисень.

У 1956р. Р. Емерсон експериментально довів, що фотосинтез пов'язаний з протіканням двох хімічних реакцій, які обумовлені двома різними пігментними системами рослини. Створення органічних речовин в рослині пов'язано з протіканням складної багатоступінчастої системи фотохімічних реакцій. Було встановлено, що для реалізації акту фотосинтезу необхідно поглинути не менше 10 квантів енергії випромінювання. [168]. При цьому не кожен фотон може бути ефективно поглинений, тому що енергетичні рівні молекули є квантованими і значення поглиненого кванта енергії повинно їм відповідати.

У реальних теплицях фотосинтезні процеси в рослинах відбувається за схемою нелінійного фоторіймача-хлорофілу. Характер нелінійності кривої ефекту залежить не тільки від нелінійності самого процесу фотосинтезу, а й від

виду критерію, за яким оцінюється ефективність випромінювання. Приймач в силу нелінійності кривої чутливості є також неадитивним.

Ефективність впливу енергії оптичного випромінювання можна оцінювати за реакцією біологічного об'єкта. Існує кілька критеріїв оцінки ефективності дії енергії випромінювання на рослини. При фізіологічних дослідженнях доцільно оцінювати інтенсивність фотосинтезу за виділеним киснем, як в хімічній реакції. З точки зору виробничо-господарської діяльності ефективність енергії оптичного випромінювання необхідно оцінювати за кінцевим продуктом (за масою плодів, листя, загальною біомасою і т. п.) в залежності від того, яка частина рослини представляє господарський інтерес.

Слід зазначити, що в процесі вирощування рослин в спорудах захищеного ґрунту на розвиток рослини крім опромінення впливають і інші фактори, що формують середовище, в якій воно росте: температура, вологість, кількість вуглекислого газу, мікроелементи. Тому реакція біологічного сприймання залежить не тільки від опромінення, а й від цілого комплексу додаткових чинників, які визначають життєдіяльність рослини не тільки в період опромінення, а й також у попередні періоди.

Завдяки цьому кількісна оцінка ефективності дії енергії оптичного випромінювання являє собою досить складну багатопараметричну нелінійну функцію.

Життєдіяльність рослин складається із двох взаємозалежних процесів - речовинного обміну й енергообміну. Основними енергетичними джерелами фотосинтезуючих рослин є оптичне випромінювання й теплота навколишнього середовища, що характеризується температурою. Оптичне випромінювання робить багатосторонній вплив на рослини. Від спектрального складу випромінювання, величини опромінення й чергування періодів опромінення й перерв в опроміненні залежить не тільки фотосинтез, але й багато інших фізіологічних процесів. Все різноманіття дії випромінювання на рослини з енергетичної точки зору зручно розділити на дві групи.

До першої варто віднести всі регулюючі, або каталітичні дії. Це, у першу чергу, фотоперіодична дія, вплив випромінювання на розвиток і формування рослин й ін. При таких впливах невелика кількість поглиненої енергії випромінювання викликає певні реакції в організмі, які приводять до мобілізації внутрішньої енергії. Для забезпечення регулюючого впливу потрібен невеликий рівень опромінення, так званий нижній граничний рівень. Подальше збільшення опромінення більше граничного значення не підвищує відповідну реакцію. Каталітичну дію випромінювання на рослини в багатьох випадках можна замінити дією інших фізичних факторів (температури й ін.).

До другої групи відносяться енергетичні впливи. Загальна енергетична дія складається з фотосинтетичного й теплого. Основна кількість енергії випромінювання, що поглинає рослиною, нагріває рослини й переходить у хімічну завдяки фотосинтезу. Енергія, засвоєна при фотосинтезі, використовується рослиною на здійснення життєвих функцій і накопичується в органічних речовинах. Невелика кількість енергії випромінювання, поглиненої листям (1-2%), виділяється у вигляді люмінесценції.

Для здійснення фотосинтезу й нагрівання рослин випромінюванням необхідні великі інтенсивності оптичної енергії. Інтенсивності фотосинтезу й нагрівання в значних межах пропорційні опроміненості. Зі збільшенням рівня опроміненості інтенсивність цих процесів зростає. Відомо, що із кількості падаючої на рослини енергії випромінювання (W) частина відбивається ($W_{\text{відб}}$), частина пропускається ($W_{\text{пр}}$), а інша частина поглинається ($W_{\text{п}}$).

$$W = W_{\text{відб}} + W_{\text{пр}} + W_{\text{п}}. \quad (2.1)$$

Відбита енергія є прямою втратою. Пропущена енергія поглинається ґрунтом або іншими субстрагами й викликає нагрівання їх і навколишнього повітря. Тільки безпосередньо поглинена енергія впливає на рослини. Зневажаючи незначною люмінесценцією й енергією випромінювання, затрачуваною на каталітичні реакції, баланс поглиненої енергії випромінювання можна записати так:

$$W_{\pi} = W_{\phi} + W_{\tau} \quad (2.2)$$

де W_{ϕ} — енергія випромінювання, що викликає фотосинтетичну дію;
 W_{τ} — енергія випромінювання, що викликає нагрівання рослини.

2.2. Визначення показників випромінювання, з якими повинна узгоджуватися температура культивацийного приміщення з метою найбільш повного використання енергії на фотосинтез.

Основні фізіологічні процеси рослин, що залежать від випромінювання, носять вибіркового характер. Максимуми спектрів дії різних процесів не збігаються. Окремі фізіологічні реакції рослин на випромінювання не обмежуються вузькими ділянками довжин хвиль, а простягаються протягом всієї видимої області спектра й навіть за її межами (рис. 1.1).

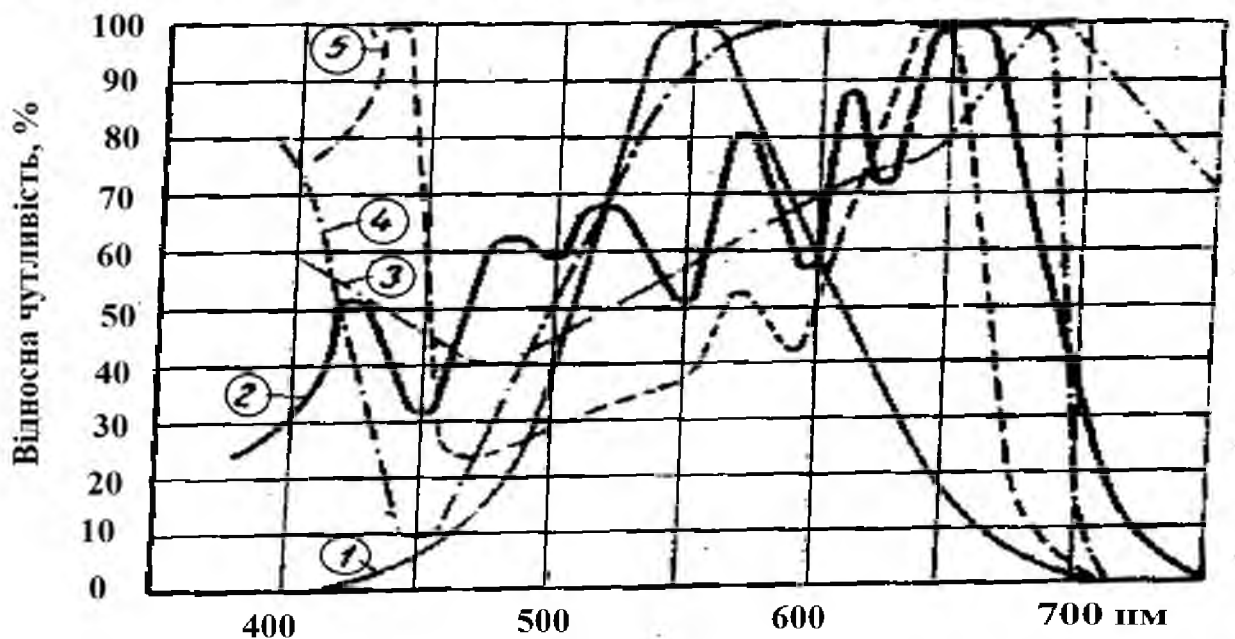


Рис. 2.1. Спектрограма основних фізіологічних процесів рослин:

1 - спектральна чутливість ока людини; 2 - фотосинтез; 3 - розміри листка;
 4 - розвиток рослини; 5 - утворення хлорофілу.

Спектральний склад сонячного випромінювання, що досягає поверхні Землі, як відомо, непостійний і змінюється залежно від висоти Сонця над обрієм і стану атмосфери. У захищеному ґрунті (теплиці, парники) спектральний склад природного випромінювання значною мірою може обумовлюватися оптичними характеристиками прозорої покрівлі (скло, плівка). Спектр випромінювання

різних штучних джерел також не однаковий. Для того самого типу лампи він може змінюватися залежно від параметрів мережі електроживлення, умов і тривалості експлуатації. Тому неможливо точно врахувати ту або іншу реакцію рослини на вплив випромінювання різного спектрального складу виміром інтегральної потужності окремої ділянки спектра приладом з неселективною чутливістю. У цей час широко застосовується, на жаль, цей метод оцінки випромінювання у світлофізіології рослин і практичному рослинництві. Тому пропонується методика вибору технічних засобів і методу впровадження спектральних досліджень оптичного випромінювання. Єдино правильним підходом до оцінки різних видів впливу неоднорідного випромінювання на рослини є визначення відповідних спектрів дії й вимір випромінювання за допомогою приладів, що мають спектральну чутливість, подібну до даного спектра.

Для вимірювання даних величин необхідно використовувати спеціальне обладнання та методики. Але достовірність отриманих даних в значній мірі залежить від характеристик застосованого оптичного приладу та вірного вибору методики вимірювань. Головними визначальними показниками правильності вибору вимірювального обладнання є його спектральні та інтегральні характеристики, наприклад: відповідні чутливості для фотоелектричного приймача, та енергетичні криві спектрального розподілу випромінювання, що поступає на досліджуваний об'єкт.

В фотоелектричних методах досліджень потік оптичного випромінювання, що пройшов крізь товщу досліджуваного зразка чи відбився від його сприймаючої поверхні трансформується тим чи іншим фотоелектричним або термоелектричним (для інфрачервоного випромінювання) приймачем в електричний сигнал, величина якого в подальшому реєструється вимірювальним пристроєм. Розрізняють інтегральний метод дослідження (коли досліджується вплив повного спектру пучка випромінювання від джерела) і спектральний метод (досліджується вплив монохроматичного випромінювання складових ліній чи вузьких ділянок спектру випромінювання від джерела)

Фотоелектрична установка для світлотехнічних вимірювань спектральних характеристик повинна включати три основні вузли: джерело випромінювання, спектральний прилад (монохроматор) і приймач випромінювання з вимірювальною схемою.

Особливості проведення спектрофотометричних досліджень.

При проведенні спектрофотометричних досліджень необхідно:

- Зважати на те, що спектрометри (монохроматори) і спектрофотометри, що випускаються промисловістю, дозволяють безпосередньо вимірювати спектральні характеристики досліджуваних об'єктів лише у відповідній обмеженій області спектра оптичного випромінювання від конкретно рекомендованих джерел оптичного випромінювання (що зазначено в паспорті або інструкції на прилад).

- Для зменшення похибок спектральних вимірювань необхідно перевіряти відсутність розсіяного світла в вимірювальних камерах, встановлювати правильний вибір розкриття щілин вихідного вікна монохроматора (отримувати повне заповнення випромінюванням вхідної апертури монохроматора), а також перевіряти відповідність поперечного перерізу пучка випромінювання із щілини монохроматора площі опромінюваної поверхні досліджуваного об'єкту.

- Перевіряти відповідність розміщення джерела і приймача випромінювання на оптичній осі установки.

Процес вимірювання оптичних характеристик (пропускання чи відбивання випромінювання) об'єкту дослідження зводиться до реєстрації величини фотоструму (як правило в спектральних дослідженнях) або термоструму (як правило в інтегральних дослідженнях) для окремих монохромних складових у вимірювальній області спектра.

Достовірність одержаних даних суттєво залежить від спектральних властивостей вимірювального приладу: селективності поглинання в досліджуваній частині спектру, його дисперсії, ширини розкриття щілин, а також селективності характеристики чутливості приймача.

Проблем, пов'язаних з врахуванням вказаних параметрів, можна уникнути, якщо використовувати метод порівняння, при якому процес вимірювання зводиться до порівняння вимірюваного випромінювання від об'єкта дослідження з випромінюванням безпосередньо від джерела, або від еталону. При цьому визначення оптичних характеристик проводиться у відносних одиницях, що не завжди задовольняє дослідника..

Більш інформативним є отримання характеристик в іменованих (абсолютних) одиницях.

Існує два способи вимірювання абсолютних спектральних характеристик досліджуваних об'єктів:

1) визначення абсолютних характеристик безпосередньо в процесі спектральних вимірювань;

2) вимірювання відносних спектральних характеристик з наступним визначенням їх абсолютного масштабу.

Якщо спектр випромінювання еталонного джерела відомий в енергетичних одиницях і умови освітлення вхідної щільності монохроматора однакові при наявності досліджуваного об'єкта і без нього, то за співвідношенням результатів спектральних вимірювань можуть бути безпосередньо розраховані потрібні спектральні характеристики досліджуваних об'єктів в абсолютних (іменованих) одиницях:

(2.3)

$$P_{\lambda} = K \frac{i_{\lambda 0}}{i_{\lambda 0}}$$

де i_{λ} розміщенні досліджуваного зразка в монохроматичний пучок випромінювання,

$i_{\lambda 0}$ випромінювання для кожної довжини хвилі безпосередньо від джерела (при відсутності матеріалу);

K - енергетична ціна поділки вимірювального приладу

Для визначення чи перевірки абсолютної спектральної чутливості приймача випромінювання необхідна його повірка еталонним приймачем з відомою енергетичною чутливістю по спектру за відповідною методикою.

2.3.Методики вимірювання спектральних оптичних характеристик досліджуваних об'єктів

Будь який досліджуваний об'єкт характеризується трьома

характеристиками: спектральний коефіцієнт пропускання τ_λ , спектральний

коефіцієнт відбивання ρ_λ і спектральний коефіцієнт поглинання a_λ . При цьому

існує аналітична залежність:

$$\tau_\lambda + \rho_\lambda + a_\lambda = 1 \quad (2.4)$$

Значення спектральних коефіцієнтів ρ_λ і τ_λ вимірюються експериментально, а значення a_λ обчислюють за формулою (3).

$$a_\lambda = 1 - \tau_\lambda - \rho_\lambda \quad (2.5)$$

Вимірювання відносних спектральних коефіцієнтів пропускання

Методика полягає у визначенні та порівнянні сигналів фотоелектричного приймача випромінювання для кожної довжини хвилі безпосередньо від джерела (при відсутності матеріалу) $i_{\lambda 0}$ і при розміщенні досліджуваного зразка в монохроматичний пучок випромінювання $i_{\lambda x}$ за виразом

$$\tau_x = \frac{i_{\lambda x}}{i_{\lambda 0}} \quad (2.6)$$

Точність результатів вимірювань малих значень спектрального коефіцієнта пропускання ($\tau < 1\%$) значно підвищується, якщо випромінювання від джерела попередньо послаблювати за допомогою каліброваних послаблювачів променистого потоку (нейтральних світлофільтрів).

Методика вимірювання спектральних коефіцієнтів направлено відбивання використовується для дослідження непрозорих об'єктів (листя рослин). При цьому використовують відносний метод вимірювань, коли відбитий поверхнею досліджуваного об'єкту сигнал приймача випромінювання порівнюється із сигналом від еталонного дзеркала. Вимірювши сигнали приймача від еталонного дзеркала $i_{\lambda 0}$ і від досліджуваного зразка $i_{\lambda x}$, обчислюють спектральний (монохроматичний) коефіцієнт направлено відбиття за виразом

$$\rho_{\lambda H} = \frac{i_{\lambda x}}{i_{\lambda 0}} \quad (2.7)$$

Методика вимірювання дифузних спектральних коефіцієнтів пропускання і відбивання

Величина спектрального коефіцієнта пропускання і відбиття в заданому напрямку об'єктів з дифузним розсіюванням, може бути оцінена за результатами вимірювання коефіцієнта яскравості під відповідним кутом щодо падаючого монохроматичного пучка випромінювання. Методика вимірювання й розрахункові формули аналогічні вимірюванням направлено відбиття та пропускання.

Для особливо точних вимірювань спектральних характеристик рекомендуються вимірювання за допомогою інтегруючої фотометричної кулі. В інтегруючій кулі передбачені три отвори: для входження монохроматичного пучка в кулю, для виведення випромінювання на приймач випромінювання і для розміщення всередину кулі досліджуваного зразка (при вимірюванні характеристики відбивання). При дослідженні коефіцієнтів пропускання останній отвір повинен бути закритий спеціальною кришкою, яка забезпечує мінімальне порушення сферичності внутрішньої поверхні кулі. Всередині кулі розміщено

додатковий екран, що захищає приймач від прямого попадання на нього випромінювання, пропущеного або відбитого досліджуванним зразком.

Внутрішня поверхня кулі (в тому числі екран і спеціальна кришка) покриваються рівномірним шаром із матеріалу (сірчано-кислий барій, вуглекислий магній, окис магнію), у якого високий і неселективний коефіцієнт відбиття (більше 90% і який не змінюється в широкому інтервалі довжини хвиль (0,3 - 1,2 мкм)). Рекомендовані співвідношення розмірів: діаметр кулі ≈ 100 мм, діаметр отвору ≈ 10 мм.

Оскільки досліджувані спектральні характеристики матеріалів (коефіцієнти спектрального пропускання τ_λ і спектрального відбиття ρ_λ) одержано у відносних одиницях, то селективність чутливості вимірювальних приладів (приймачів оптичного випромінювання) не впливатиме на результати вимірювання.

Якщо є еталонне джерело, спектр випромінювання якого відомий в енергетичних одиницях, то за результатами відносних спектральних вимірювань можуть бути безпосередньо розраховані абсолютні значення спектральних характеристик (див. вираз 2.4).

При цьому визначається відповідний коефіцієнт $K_{\text{абс}}$ на який повинні бути помножені ординати відносних спектральних кривих. Додатково рекомендується за допомогою світлофільтрів з відомим пропусканням виділяти окремі ділянки спектру. Застосування світлофільтрів дозволяє уникнути помилок, пов'язаних з неточністю визначення границь спектру випромінювання, що поступає на приймач і насиченням кривої чутливості приймача.

Можливо використовувати декілька світлофільтрів і отримувати значення $K_{\text{абс}}$ як середнє арифметичне з результатів декількох вимірювань. При високих вимогах до точності абсолютних вимірювань рекомендується перевіряти результати, отримані спектральним методом, шляхом інтегральних вимірювань з використанням декількох еталонів та світлофільтрів. Практика показала, що середня похибка визначення величини $K_{\text{абс}}$ при цьому не перевищує $\pm 10\%$.

Існують декілька способів визначення величини K_{abc} при інтегральному методі. Для широкій практики можуть бути рекомендовані наступні:

1. Використання в якості еталону спеціальної світловиміральної лампи, у поєднанні із світлофільтрами з відомим пропусканням, прозорими у конкретній вузькій області спектра,

2. Використання приймача випромінювання з відомою абсолютною спектральною характеристикою чутливості.

В дослідженні вимірюється фотострум від еталонного зразка (I_e) і досліджуваного об'єкта (I_x), і значення K_{abc} розраховується при використанні еталонної світловиміральної лампи (без світлофільтрів) за формулою.

$$K_{abc} = \frac{I_x}{I_e} \cdot \frac{N}{683} \cdot \frac{\int_0^{\infty} \rho'_{\lambda e} \phi'_{\lambda} d\lambda \int_{0,38}^{0,76} \rho'_{\lambda x} v_{\lambda} d\lambda}{\int_0^{\infty} x \rho'_{\lambda x} \phi'_{\lambda} d\lambda \cdot \int_{0,38}^{0,76} \rho'_{\lambda e} v_{\lambda} d\lambda} \quad (2.8)$$

де N - нормований світловий параметр (світловий потік, або сила, кд);

683 - світловий еквівалент променистої потужності, Лм/вт;

$\rho'_{\lambda e}$ - відносна спектральна потужність, яка створюється світловим

еталоном;

$\rho'_{\lambda x}$ - відносна спектральна потужність, яка створюється досліджуваним джерелом;

ϕ'_{λ} - відносна спектральна чутливість обраного приймача випромінювання

(в нашому випадку - ФАР випромінювання);

v_{λ} - коефіцієнт відносної видимості.

Розрахункові формули у випадку застосування світлофільтрів з відомим спектральним пропусканням τ_{λ} , аналогічні співвідношенню (2.4) з тією різницею,

що величина ϕ_{λ} повинна бути замінена добутком $\phi_{\lambda} \tau_{\lambda}$, що характеризують пропусканню здатність світлофільтра.

В другому способі вимірюється фотострум I_x сталонного приймана випромінювання з відомою спектральною чутливістю під дією випромінювання досліджуваної лампи з наступним розрахунком K_{abc} за формулою:

$$K_{abc} = \frac{I_x}{\int_0^{\infty} \rho'_{\lambda x} \phi'_{\lambda} d\lambda \cdot \sum_{i=1}^n \phi'_{\lambda x} \phi'_{\lambda}} \quad (2.9)$$

Точність вимірювання спектрального розподілення випромінювання залежить від типу джерела світла. За формою спектральної кривої випромінювання їх можна умовно поділити на два основні класи:

- 1) джерела з безперервним чи змішаним спектром випромінювання – лампи розжарювання, газорозрядні дугові лампи з водневим (типу ДВС), дейтерієвим (типу ДДС), ксеноновим (типу ДКсТ і ДКсШ), ртутним (типу ДРЛ), натрієвим (типу ДНаТ) наповненням та світлодіодні джерела випромінювання;
- 2) джерела з лінійчастим спектром випромінювання - ртутні лампи низького тиску типу ЛС, ДБ, високого тиску типу ДРТ, спеціальні спектральні лампи та лазери;

Для правильного визначення величини спектрального випромінювання спочатку необхідно виділити величину фотоструму обумовленого фоном від повного потоку випромінювання від джерела $i_{\lambda\Sigma} = i_{\lambda s} + i_{\lambda\phi}$. Величина фонового

фотоструму $i_{\lambda\phi}$ в межах спектральної лінії визначається інтерполяцією кривої фотоструму від безперервного фону, отриманої в інтервалах між спектральними лініями. Тобто, величини вимірюваної спектральної потужності сигналу досліджуваного зразка розраховуються за формулами:

Для джерела з лінійчастим спектром випромінювання потужність випромінювання лампи:

$$P_{\lambda l} = \frac{1}{\nu_{\lambda}} \cdot i_{\lambda l} \quad (2.10)$$
 Потужність фонового випромінювання:

$$P_{\lambda \phi} = \frac{1}{\nu_{\lambda}} \cdot \frac{i_{\lambda \phi} D_{\lambda}}{b} \quad (2.11)$$
 При цьому потужність випромінювання ліній в спектральному діапазоні, в якому присутній фон, визначається за співвідношенням.

$$P_{\lambda l} = \frac{1}{\nu_{\lambda}} \cdot (i_{\lambda \Sigma} - i_{\lambda \phi}) \quad (2.12)$$

Величина потужності спектрального випромінювання вимірюваного сигналу, з врахування сигналу від еталонного зразка, для джерела з суцільним спектром випромінювання вираховується за формулою:

$$P_{\Delta \lambda} = \frac{P_{\lambda \Sigma} + \frac{\rho_{\lambda \Sigma} \cdot b}{D_{\lambda}}}{i_{\lambda \Sigma}} \cdot i_{\lambda x} \quad (2.13)$$

Де:

$\Delta \lambda$ - інтервал довжини хвилі, виділений монохроматором;

$P_{\lambda \Sigma}$ - потужність випромінювання ліній еталонного джерела, Вт;

$\rho_{\lambda \Sigma}$ - спектральна щільність безперервного випромінювання еталонного джерела, Вт/нм;

b - ширина розкриття середньої щілини двопроменевого монохроматора (або вихідної щілини однопроменевого), мм;

D_{λ} - оптична дисперсія монохроматора, мм/нм;

$i_{\lambda \Sigma}$ - величина спектрального фотоструму приймача;

ν_{λ} - спектральна чутливість приймача.

При послідовному вимірюванні спектра випромінювання еталонного джерела, а потім досліджуваного об'єкту слід попередньо визначити спектральну чутливість V_λ [мА/лм] в досліджуваному інтервалі $\Delta\lambda$ та врахувати у відповідних виразах.

$$V_\lambda = \frac{i_{\lambda_0}}{P_{\lambda_0}} = \frac{\rho_{\lambda_0} \cdot b}{D_\lambda} \quad (2.14)$$

Слід зазначити, що чим менші значення вимірюваного сигналу тим більше зростає вплив шумового фотоструму, обумовленого як електрофізичними особливостями побудови самого приймача так і особливостями побудови оптичної вимірювальної системи. [18].

Узагальнюючи вище наведене можна констатувати наступне:

Найбільш доступними у виробничих умовах методами визначення оптичних характеристик досліджуваних об'єктів (вироснутих рослин) є фотоелектричні методи досліджень у відносних одиницях, коли покази вимірювального приладу співвідносяться до інших, прийнятих за еталон (ними можуть бути покази вимірювального приладу пропорційні випромінюванню безпосередньо від джерела або випромінюванню від еталону).

Найбільш інформативними методами досліджень є фотоелектричні методи досліджень у іменованих (абсолютних) одиницях, хоча потребують досить складних розрахунків щодо врахування чутливості сприймаючого приладу до спектру випромінювання. Зокрема сумарну енергетичну (фотосинтетичну + теплову) дію випромінювання на рослині потрібно визначати за допомогою приладу, який має спектральну чутливість, що збігається зі спектром поглинання листа вирощуваної рослини.

Наведені вище викладки будуть використані нами в подальшому при визначенні фотосинтезної ефективності різних джерел оптичного випромінювання, що використовуються в спорудах захищеного ґрунту.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ОЦІНКИ ФОТОСИНТЕЗНОЇ

ЕФЕКТИВНОСТІ ДЖЕРЕЛА ОПТИЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ДЛЯ СВІТЛОКУЛЬТУРИ РОСЛИН

НУБІП України

3.1. Визначення показників впливу енергії оптичного випромінювання на розвиток рослин.

Падаючий від джерела оптичного випромінювання ефективний потік, що спричиняє сумарну енергетичну дію на рослини Φ_n , можна визначити з формули:

$$\Phi_n = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varphi(\lambda) \times \alpha(\lambda)_p \times d\lambda \quad (3.1)$$

де $\varphi(\lambda)$ — величина спектральної інтенсивності випромінювання від джерела;
 $\alpha(\lambda)_p$ — спектральний коефіцієнт поглинання листа рослини;
 $\lambda_1; \lambda_2$ — граничні значення довжин хвиль випромінювання, що поглинається рослинами.

Енергія, яку отримує рослина за певний час опромінення визначається

як:

$$W_{\varphi} = \Phi_n \times t \quad (3.2)$$

де t — час опромінення;

W_{φ} — енергія випромінювання, поглинена рослиною за час t .

Тоді відповідно до виразу (2) можна записати ефективний потік, що робить загальний енергетичний вплив на рослини, як суму фітопотoku Φ_{ϕ} , що може бути використаний рослиною на фотосинтез, і теплового потоку Φ_{τ} , енергія якого може перетворитися в рослині в тепло:

$$\Phi_{\pi} = \Phi_{\phi} + \Phi_{\tau} \quad (3.3)$$

Величину фітопотoku можна визначити, користуючись формулою:

$$\Phi_{\phi} = g_{\lambda m} \int_{\lambda=300}^{\lambda=750} \varphi(\lambda) \times K(\lambda)_{\phi} \times d(\lambda) \quad (3.4)$$

де $g_{\lambda m}$ — максимальне значення спектральної інтенсивності фотосинтезу;
 $k(\lambda)_{\phi}$ — відносна спектральна інтенсивність фотосинтезу.

Оскільки, чим менш сприятливі для фотосинтезу умови, тим більша частина енергії падаючого потоку буде перетворюватися в теплову для підтримання життєдіяльності клітин рослини. Енергія фітопотoku, перетворювана в тепло, залежить від величини інтенсивності опромінення. Чим ближче величина фітоопромінення до значення насичення кривої фотосинтезу, тим більша кількість енергії фітопотoku буде перетворюватися в тепло.

НУБІП України

Під тепловим потоком Φ_T розуміється та частина потужності променистого потоку, яка внаслідок фізичних властивостей випромінювання, оптичних властивостей рослин й особливостей процесу фотосинтезу в принципі не може бути перетворена в хімічну енергію органічних речовин.

Величину теплового потоку Φ_T для випромінювання будь-якого спектрального складу можна визначити за наступною формулою:

$$\Phi_T = \int_{\lambda=300}^{\lambda=3000} \varphi(\lambda) \times K(\lambda)_T \times d\lambda$$

(3.5)

де $K(\lambda)_T$ — спектральний коефіцієнт теплової дії оптичного випромінювання на рослини.

Користуючись виразами (3.1) — (3.5), можна визначити значення $K(\lambda)_T$ як різницю спектрального коефіцієнта поглинання листа рослини й спектральної інтенсивності фотосинтезу, тобто

$$K(\lambda)_T = \alpha(\lambda)_p - q_{lm} \times K(\lambda)_\phi$$

(3.6)

Таким чином, із загального потоку оптичного випромінювання, що падає на рослини, виділяють дві найбільш важливі складові: фітопотік і тепловий потік.

Перший являє собою ту частину енергії (потужності) випромінювання, що при найбільш сприятливих умовах може бути використана рослинами безпосередньо на фотосинтез. Другий - ту частину енергії випромінювання, що у принципі рослини не можуть використати безпосередньо на фотосинтез, а лише перетворюють у тепло. Зазвичай, в практиці, умови опромінення рослин характеризуються значенням опромінення, що являє собою величину потоку, який поступає на одиницю опромінюваної поверхні.

Вищенаведені викладки дозволяють зробити наступні висновки: основними показниками опромінення рослин, за якими повинна узгоджуватися температура культиваційного приміщення із найбільш повним використанням оптичної енергії на фотосинтез є величини фітоопромінення E_ϕ і теплового опромінення E_T .

3.2. Розробка методики оцінки фотосинтезної ефективності джерела оптичного випромінювання

При оцінці біологічної ефективності випромінювання для рослин закритого ґрунту використовують, як правило, визначення ефективності джерел випромінювання за системою фотосинтезних величин, в основі якої є фотосинтезний потік або фітопотік, що визначається за формулою 3.6:

В той же час більш точним і інформативнішим є оцінка ефективності джерел за співвідношенням між потоками квазімонохроматичного

випромінювання в ряді експериментально встановлених ефективних ділянок видимої області спектру. Враховуючи те, що фактично у фотосинтезі беруть участь, крім хлорофілу, також каротиноїди та інші фотопігменти, то область ФАР доцільно розбити на зони у відповідності із спектрами поглинання цих пігментів. (Рис. 1.4). Згідно ОСТ 46 140-83 фотосинтезний потік можна подати

у вигляді складових спектру, відповідно $\Delta\lambda_1=380-500$ нм, $\Delta\lambda_2=500-600$ нм і $\Delta\lambda_3=600-780$ нм:

$$\Phi_{\text{фос}} = \Phi_e \sum_{380}^{780} \bar{S}_i \cdot K_{\text{ф}}(\lambda_i) = \Phi_e (\bar{S}_1 \cdot K_{\text{ф}}(\lambda_1) + \bar{S}_2 \cdot K_{\text{ф}}(\lambda_2) + \bar{S}_3 \cdot K_{\text{ф}}(\lambda_3)) \quad (3.7.)$$

Де

Φ_e – потік ФАР; \bar{S}_i – усереднена відносна енергія випромінювання на i -й ділянці спектру $\Delta\lambda_i$ у відсотках до загального випромінювання ФАР; $K_{\text{ф}}(\lambda_i)$ – функція спектральної фотосинтезної ефективності випромінювання, яка згідно ОСТ 46 140-83 приймається: $K_{\text{ф}}(\lambda_1)=0,6$; $K_{\text{ф}}(\lambda_2)=0,4$; $K_{\text{ф}}(\lambda_3)=1,00$.

В обох підходах для оцінки фотосинтезної ефективності випромінювання необхідно знати спектральну густину потоку випромінювання $\rho(\lambda)$, яка в більшості випадків записується у відносних одиницях. Для даного випадку пропонується методика розрахунку фотосинтезного потоку, потоку ФАР і оцінки ККД ламп.

Для розрахунків брались світловий потік та спектральний розподіл випромінювання конкретного джерела фотосинтезного випромінювання. Ці

величини отримувалися експериментально або з інформаційних листків виробника. Вимірювання спектрального розподілу джерел випромінювання проводилося на розробленій автоматизованій спектрометричній установці, зібраній на базі монохроматора СФ-4М. Світловий потік вимірювався у фотометричній кулі з селеновим приймачем, спектральна чутливість якого нормалізована функцією відносної спектральної світлової ефективності випромінювання $V(\lambda)$ для денного зору.

Значення світлового потоку від досліджуваного джерела визначалося за виразом:

$$\Phi = m \cdot 683 \int_{380}^{780} \phi(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda, \quad (3.8)$$

де m – масштабний коефіцієнт.

Інтеграл $\int_{380}^{780} \phi(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda = S_c$ через площу фігури, обмеженої графіком добутку функцій $\phi(\lambda) V(\lambda)$ та віссю довжини хвиль.

За виміряним світловим потоком та площею S_c визначався масштабний коефіцієнт:

$$m = \frac{\Phi}{683 \cdot S_c}. \quad (3.9)$$

Через коефіцієнт m та площу під відповідними графіками визначалися повний потік випромінювання, що припадає на видиму частину спектру –

$$\Phi_e = m \cdot \int_{380}^{780} \phi(\lambda) \cdot d\lambda = m \cdot S, \quad (3.10)$$

а також фотосинтезний потік (ФАР) або фітопотік

$$\Phi_{fc} = m \cdot \int_{380}^{780} \phi(\lambda) \cdot V_{fc}(\lambda) \cdot d\lambda = m \cdot S_{fc}. \quad (3.11)$$

Коефіцієнт корисної дії випромінювання джерела для світлового та фотосинтезного потоків визначалися згідно формул.

$$\eta_e = \frac{\Phi_e}{S_e} = \frac{\Phi_{fc}}{\Phi_e} = \frac{S_{fc}}{S} \quad (3.12)$$

Усі розрахунки проводились на ПЕОМ за спеціально розробленою програмою.

Результати експериментів та розрахунків, отриманих для ряду найбільш поширених джерел випромінювання, подані в таблиці 2.4.

Також було проведено визначення ефективності джерел у співвідношенні між ефективними потоками квазімонохроматичного

випромінювання в окремих ділянках. Незважаючи на різні підходи оцінки ефективності, вони не суперечать один одному, а, навпаки, доповнюють і

дають близькі за величиною результати. Приведені в таблиці дані підтверджують результати Козиревої І.Н. та Малишева В.Д. [] та дозволяють

констатувати, що найбільш перспективними джерелами для світлокультури рослин, які поряд з високою енергетичною ефективністю мають хорошу

фітовіддачу, є натрієві лампи високого тиску і світлодіодні комбіновані джерела випромінювання.

Таблиця 3.1

Тип джерела випромінювання	Світловий потік, КЛм	Повний потік випромінювання, Вт	Фіто-потік, фіт	Коефіцієнт корисної дії, %		Фітовіддача джерела, фіт/Вт	Світло-віддача джерела, Лм/Вт	Віддача джерела в області ФАР, Вт/Вт
				фото-синтезу	світлової			
ДБРНаГ-100	7	20.6	10.2	49.3	49.9	0.102	70	0.21
ДРЛФ-400	20	52.9	27.9	52.2	55.6	0.070	50	0.13
ДНаГ-400	47.5	106.9	56.1	52.5	65.3	0.140	118.8	0.27
ДРФ-1000	72	236.8	106.3	44.9	44.7	0.106	72	0.24
ДРИ-1000-2	70	273.6	134.7	49.2	37.6	0.134	70	0.27

ДРИ-2000-2	190	476	234	49.2	58.7	0.117	95	0.24
Світлодіодний світильник	9	38	29	77.1	34.7	0.488	85	0.63
ДНаС-340	30	109.2	56.6	51.8	32.1	0.166	88.2	0.32

3.3. Розробка математичної моделі визначення фактичної фітоопроміненості в теплиці.

Одним із шляхів зниження витрат електроенергії на світлокультуру рослин є вдосконалення методів розрахунку фотосинтезного опромінення з подальшим автоматичним підтриманням ефективного рівня опроміненості.

При розрахунку освітленості та опроміненості у виробничих приміщеннях у нашій країні найбільш поширеними є методи коефіцієнта використання світлового потоку (КВСП), точковий метод (ТМ) та метод питомої потужності (МПП). Ці апробовані понад 50 років методи мають ряд недоліків. Зокрема, метод КВСП дає можливість визначити еносередковане значення освітленості (опроміненості) лише на горизонтальній робочій поверхні; точковий метод розрахунку не враховує відбиття потоку оптичного випромінювання від стін і стелі; метод питомої потужності взагалі використовується для наближених попередніх розрахунків [46].

Існують більш досконалі сучасні методи розрахунку освітлення в програмних середовищах DIALux, Relux Professional, Lightscape, Calculux і EUROPIС [2,4]. Загальним недоліком даних комп'ютерних програми є відсутність зручних засобів роботи з фотометричними даними конкретних приміщень та опромінювачів. Для кожного проєкту необхідно створювати базу даних застосованих світильників, що ускладнює і уповільнює роботу.

Тому нами була поставлена задача: створення універсального методу, який дозволяє підвищити точність визначення фактичної фотосинтезної

опроміненості на рівні листя рослин за рахунок урахування додаткового випромінювання відбитого та розсіяного у просторі поверхніми стін і стелі типу і характеристик конкретного джерела випромінювання

Даний метод розрахунку опроміненості, на відміну від існуючих методів розрахунку передбачає додатково врахувати випромінювання, яке падає на рослини, відбиваючись від поверхонь стін та стелі. Для цього пропонується розглядати стіни і стелю як додаткові дифузно випромінюючі джерела нерівномірної яскравості. Тоді опроміненість на будь-якій точці

горизонтальної розрахункової поверхні можна визначити як суму опроміненостей, утворених прямим випромінюванням світильників і відбитим від стін і стелі за виразом:

$$E(x,y) = E_{св}(x,y) + E_{стін}(x,y) + E_{стелі}(x,y), \quad (3.13)$$

де $E_{св}$ – опроміненість, утворена прямим фотосинтезним потоком світильників;

$E_{стін}$ – опроміненість, утворена відбитим від стін фотосинтезним потоком;

$E_{стелі}$ – опроміненість, утворена фотосинтезним потоком, відбитим від стелі між світильниками.

Розглядаючи світильники як точкові джерела [46], опроміненість у точці на розрахунковій поверхні, яка утворена прямим випромінюванням світильників, розрахуємо за відомою формулою

$$E = \frac{F}{1000} \cdot \sum_n \frac{I_{\alpha_n} \cos^3 \alpha_n}{H_p^2}, \quad (3.14)$$

де F – фотосинтезний потік лампи, фіт, (фіт - 1 Вт потоку з довжиною хвилі 680 нанометрів) [64],

I_{α} – сила фотосинтезного випромінювання світильника в напрямку опромінюваної точки на поверхні листа рослини, фт/стерадіан;
 α – кут між перпендикулярною віссю світильника і лінією, яка з'єднує світловий центр світильника з точкою на опромінюваній поверхні, град;

H_p – перпендикулярна відстань від світильників до розрахунковій поверхні, м.

Визначивши $\cos\alpha_n$ через координати розташування опромінюваної

точки та n-ного світильника, отримаємо

$$E_p(x, y) = \frac{F}{1000} \sum_n \frac{Z_n \cdot I_{\alpha_n}}{\sqrt{Z_n^2 + (x - X_n)^2 + (y - Y_n)^2}^3} \left[\arccos \frac{Z_n}{\sqrt{Z_n^2 + (x - X_n)^2 + (y - Y_n)^2}} \right] \quad (3.15)$$

де X_n, Y_n, Z_n – координати розташування n-го світильника у вибраній системі координат;

x, y – поточні горизонтальні координати опромінюваної точки на поверхні листка рослини.

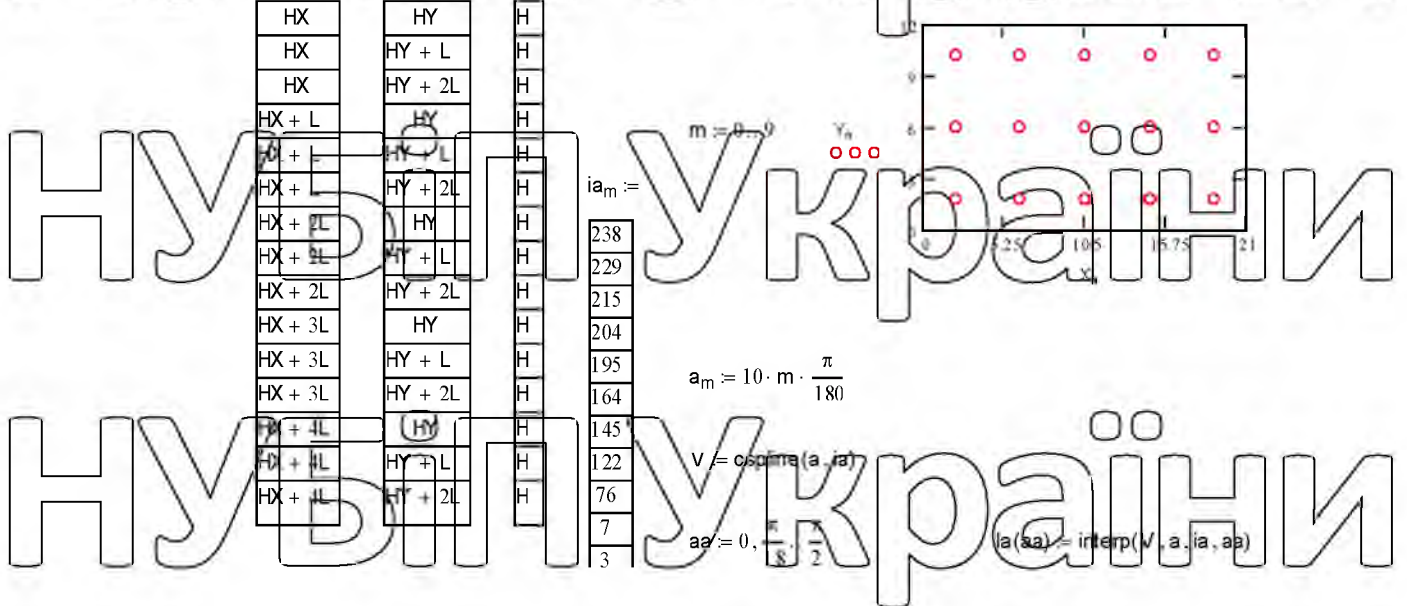
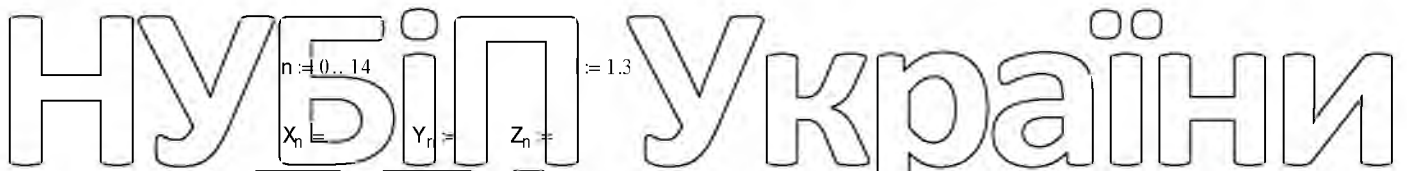
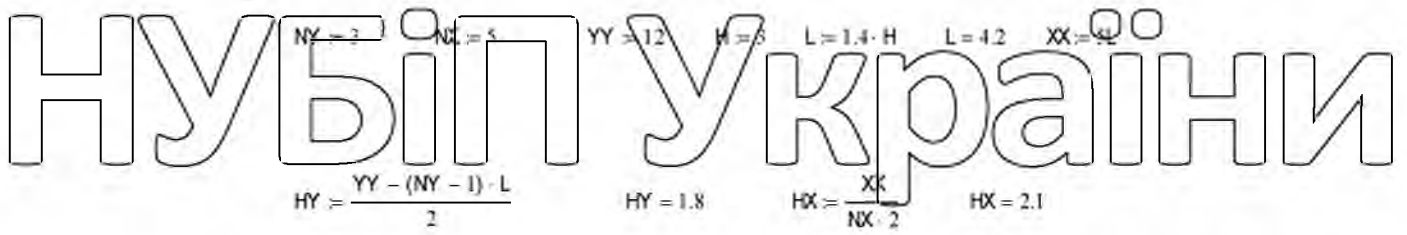
Розрахунки проводимо за допомогою програмного середовища Mathcad

В даних розрахунках приймаємо наступні позначення:

NY – кількість рядів світильників; NX – кількість світильників в

ряду; H – висота підвісу світильників; L – відстань між світильниками.

Тоді маємо



На графіку праворуч показано розміщення світлодіодних світильників під стелею теплиці. Залежність сили світла від кута визначаємо функцією.

Для цього здійснюємо сплайн-апроксимацію залежності сили фотосинтезного випромінювання від кута α її випромінювання від джерела, яка зазвичай задана в табличній формі для конкретного світильника з конкретним джерелом оптичного випромінювання [24].

Апроксимація на ПЕОМ виконується так, щоб середньоквадратична похибка наближення вихідних точок була мінімальною. На рис. 3.2 наведені функції залежності сили фотосинтезного випромінювання від кута випромінювання, відповідно, побудованими (зліва) за табличними даними світильника і (праворуч) в результаті сплайн-апроксимації в програмному середовищі.

Спостерігається їх практична ідентичність.

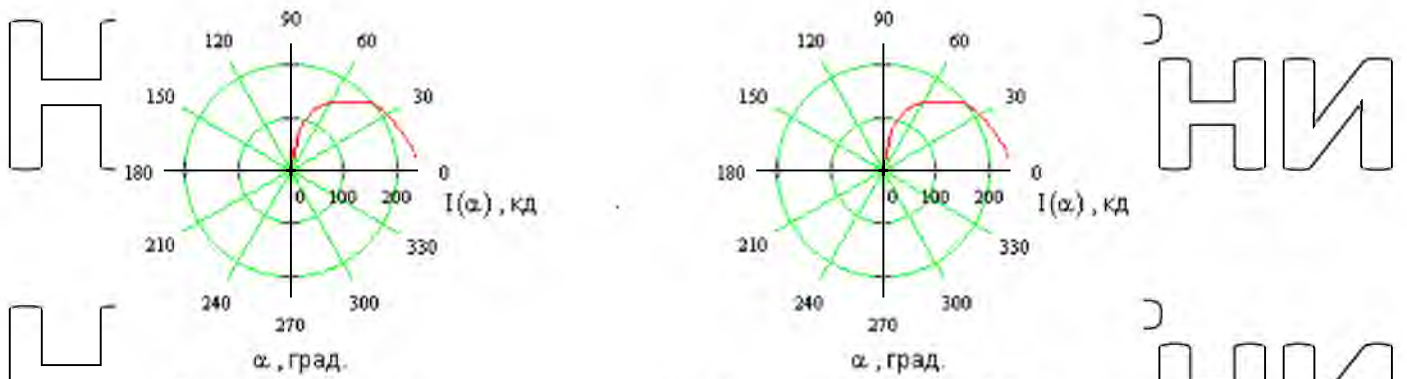


Рис. 3.2 Графіки залежності сили світла від кута: а - графік побудований за табличними даними; б - графік побудований в результаті сплайн - апроксимації

Задаючись координатами світильників, фотосинтезним потоком лампи та висотою підвісу світильників, за формулою (3.15) розраховується картина ізофит, на розрахунковій поверхні виробничого приміщення, яка утворена прямим потоком від світильників.

$$E_{ph}(x, y) = \frac{F}{1000} \sum_n \frac{Z_n \cdot I_{zn}}{\sqrt{Z_n^2 + (x - X_n)^2 + (y - Y_n)^2}^3} \cdot \arccos \frac{Z_n}{\sqrt{Z_n^2 + (x - X_n)^2 + (y - Y_n)^2}} \quad (3.16)$$

де X_n, Y_n, Z_n - координати світильників у просторі;

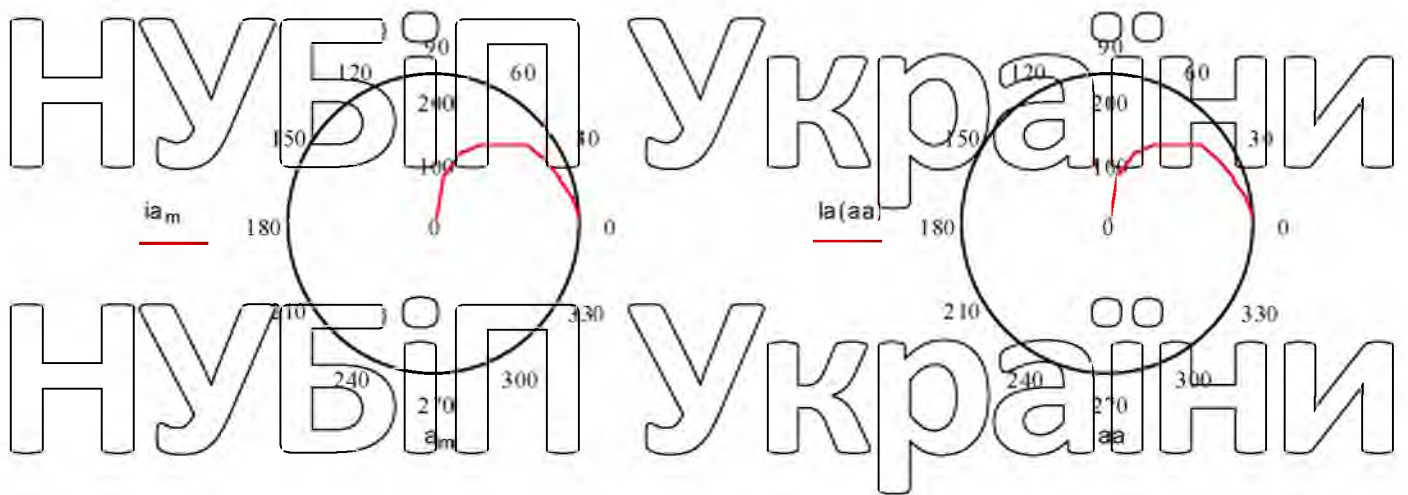
x, y - поточні координати точки;

I_{zn} - сила фотосинтезного випромінювання світильника в напрямку освітлювальної точки, фіт/ср.

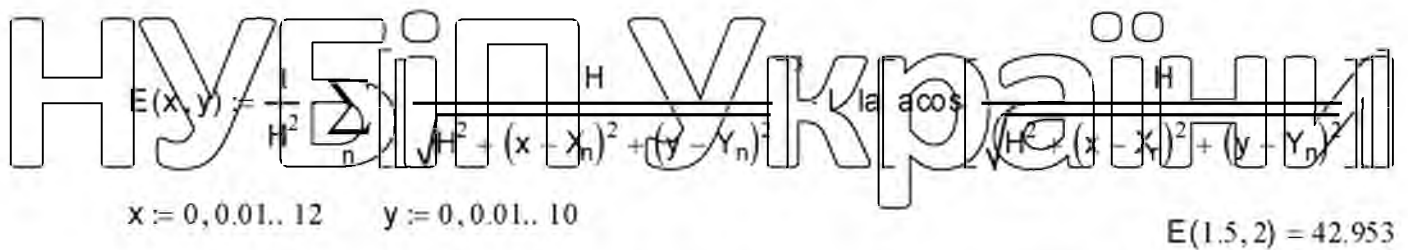
F - світловий потік лампи, лм;

Використовуючи програмне середовище Mathcad визначаємо криву

сили світла за табличними даними та експериментально.



Визначення освітленості світильників на підлозі від прямого світла світильників



На рис 3.3, показано графік розподілу опроміненості на розрахунковій поверхні нижнього листа рослини під опромінювачами в горизонтальній площині по досліджуваній площі теплиці. При цьому не враховується випромінювання відбите поверхнею стін та між рослинами.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

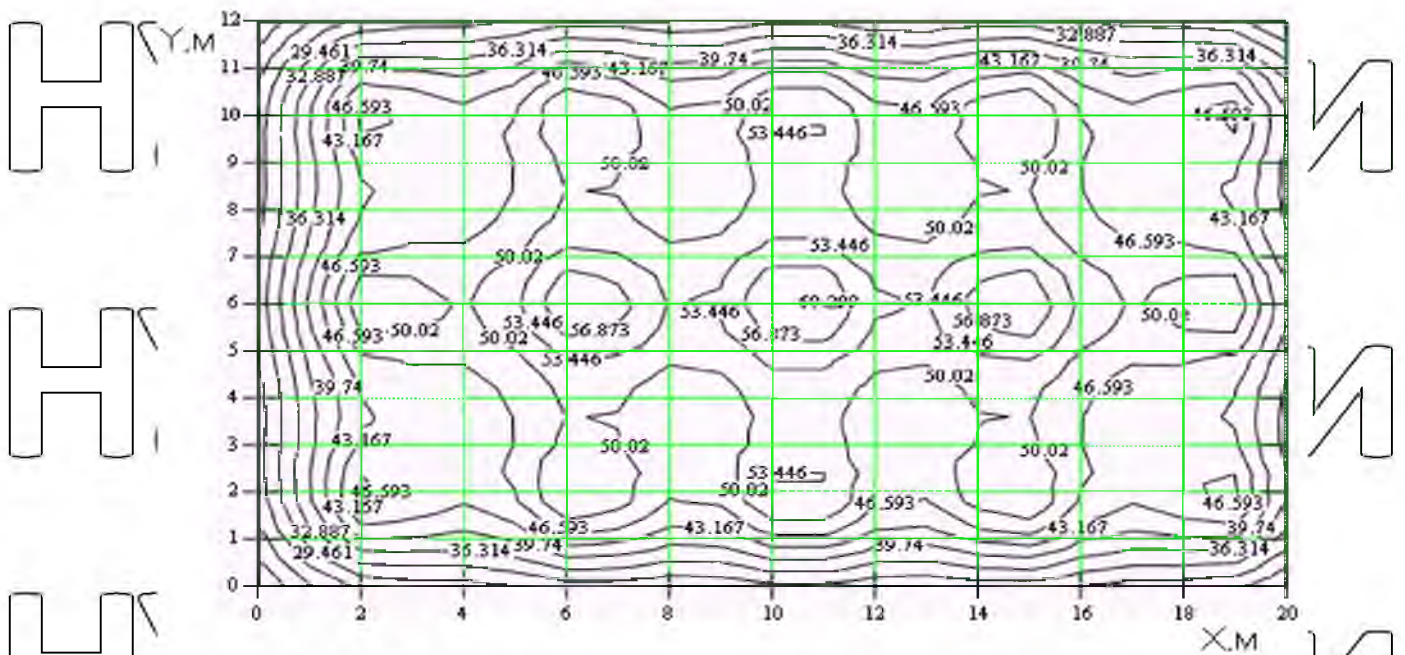


Рис. 3.3 Фрагмент ізопіт, утворених прямим фотосинтезним потоком на розрахунковій горизонтальній поверхні нижнього листа рослини у виробничого приміщення теплиці

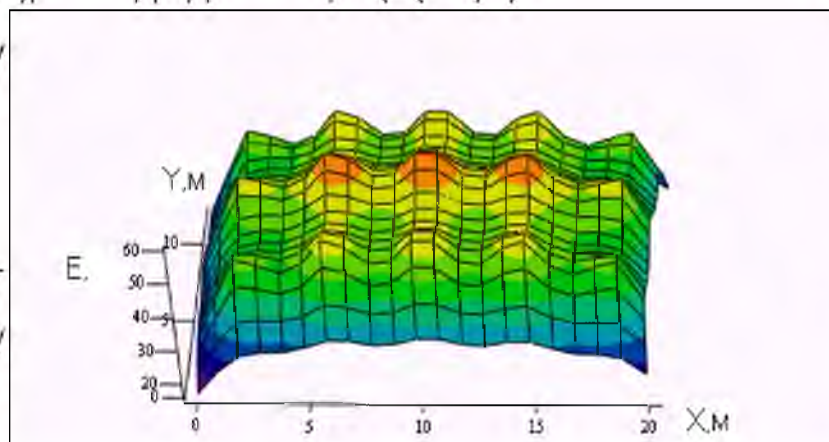


Рис. 3.4 Фрагмент ізопіт, у трьохмірній системі координат утворених прямим фотосинтезним потоком на розрахунковій поверхні виробничого приміщення.

Для того, щоб врахувати випромінювання відбите стінами тепличного приміщення необхідно представити стіну як дифузне джерело відбитого випромінювання від розміщених в теплиці опромінювачів. Визначимо

опроміненість на поверхні стіни – $E_c(x, z)$ за аналогічно (3.16) побудованою формулою

$$E_c(x, z) = \sum_n \left[\frac{Y_n}{\sqrt{(z-Z_n)^2 + (x-X_n)^2 + Y_n^2}} \right]^3 \cdot \frac{F \cdot I_{\alpha_n}}{Y_n^2 \cdot 1000} \cdot \left[\frac{\pi}{2} - \arccos \frac{Y_n}{\sqrt{(z-Z_n)^2 + (x-X_n)^2 + Y_n^2}} \right] \quad (2.2.5)$$

де X_n, Y_n, Z_n – координати світильників у просторі;

x, y – поточні координати точки;

I_{α_n} – сила випромінювання опромінювача в напрямку опромінюваної точки, фіт/ср;

F – фотосинтезний потік лампи, Фіт;

Використовуючи програмне середовище Mathcad визначаємо просторову опроміненість бічної стіни

$$E_c(x, z) = \sum_n \left[\frac{|Y_n|}{\sqrt{(z-Z_n)^2 + (x-X_n)^2 + (Y_n)^2}} \right]^3 \cdot \frac{1}{(Y_n)^2} \cdot \left[\frac{\pi}{2} - \arccos \frac{|Y_n|}{\sqrt{(z-Z_n)^2 + (x-X_n)^2 + (Y_n)^2}} \right]$$

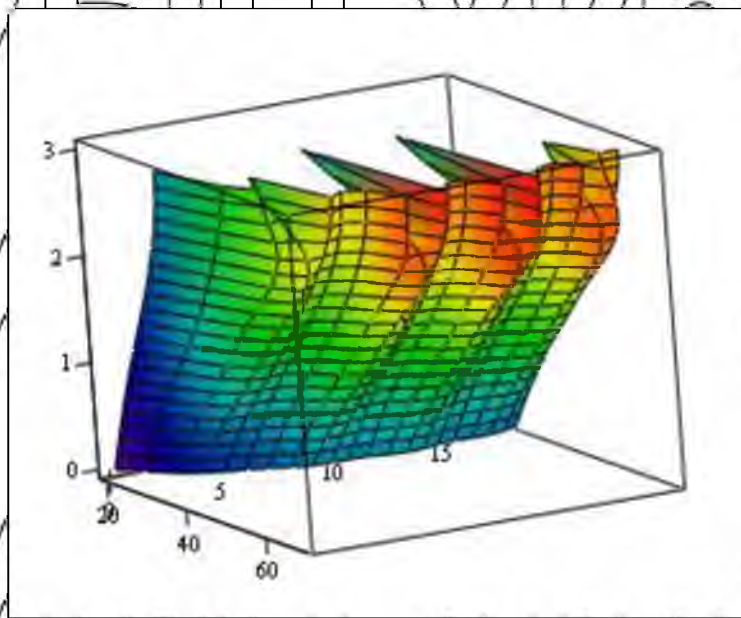


Рис.3.5. Просторова картина фотосинтезної опроміненості ділянки поверхні бічної стіни теплиці.

При рівномірному розташуванні опромінювачів по робочій площі теплиці, картина ізобіт на 75% поверхні бічної стіни складається з ділянок, які повторюються з кроком L , рівним відстані між опромінювачами.

Тобто, фрагмент картини ізолекс, приведений на рис.3.5 повторюється по бічній стіні протягом всього виробничого приміщення теплиці. На рис.3.6 показано розподіл ізофіт на торцевій стіні теплиці.

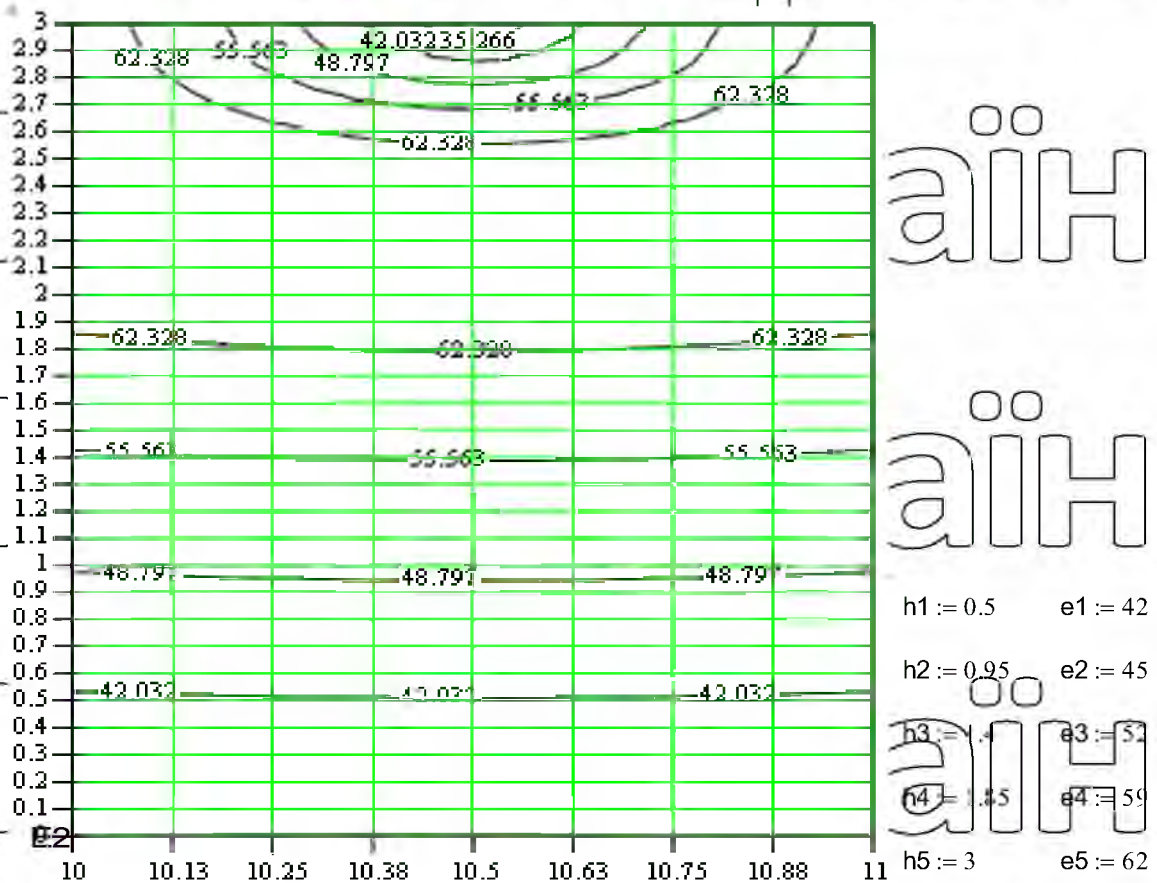


Рис.3.6. Розподіл ізофіт по вертикальній площині торцевої стіни.

Приймаючи, що яскравість стіни складається з m ряду горизонтальних, рівномірно-яскравих прямокутних зон, опроміненість $E_m(x,y)$ від кожної з них у точці на горизонтальній розрахунковій поверхні можна визначити, використовуючи вираз Хігбі-Девіна [33], за формулою

$$E_m(x,y) = \frac{E_c R_c}{\pi} \int_{h_m}^{h_{m+1}} \int_0^L \frac{z \cdot \sqrt{(X_n - x)^2 + y^2}}{[(X_n - x)^2 + y^2 + z^2]^{3/2}} dz dx, \quad (3.18)$$

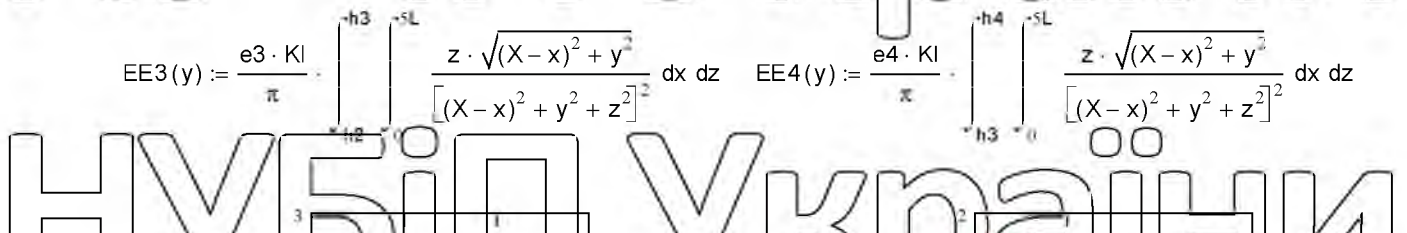
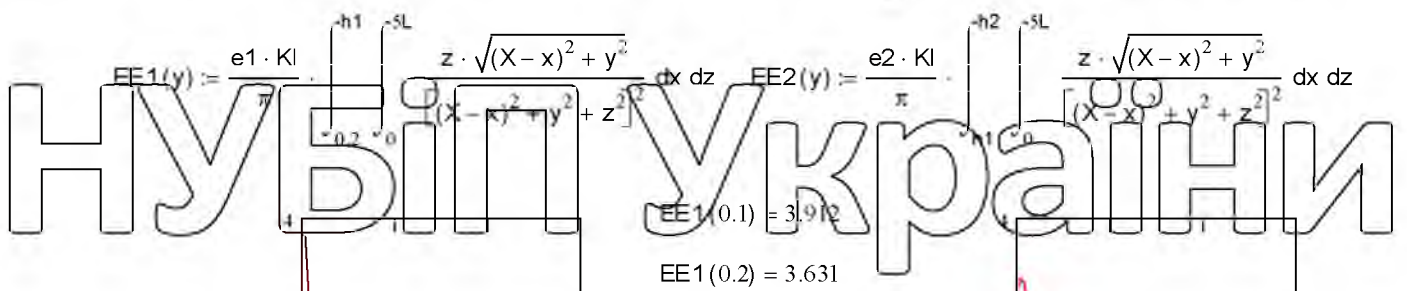
де E_c – середня опроміненість m -ї прямокутної зони на поверхні стіни, фіт/м²;

R – коефіцієнт відбиття поверхні стіни; L – відстань між світильниками, м;
 m – ширина (висота) m , – горизонтальної світлової зони стіни, що розглядається як світильник.

Використовуючи програмне середовище Mathcad визначаємо розподіл

яскравості стіни, як вторинного джерела випромінювання.

$K1 := 0.3$ $y := 0, 0.2, 1.2$ $x := 0, 5L$ $X := 2.5 \cdot L$ $\epsilon := \frac{e}{\pi}$

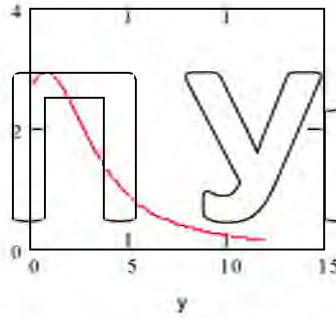


НУБІП України

НУБІП України

$$EE5(y) := \frac{e^{-k|y|}}{\pi} \cdot \frac{z \cdot \sqrt{(X-x)^2 + y^2}}{[(X-x)^2 + y^2 + z^2]^{3/2}} dx/dz$$

НУБІП України



НУБІП України

Загальна освітленість в точці на робочій поверхні виробничого приміщення, яка утворена відбитим фотосинтезним потоком стіни, буде розраховуватись за формулою:

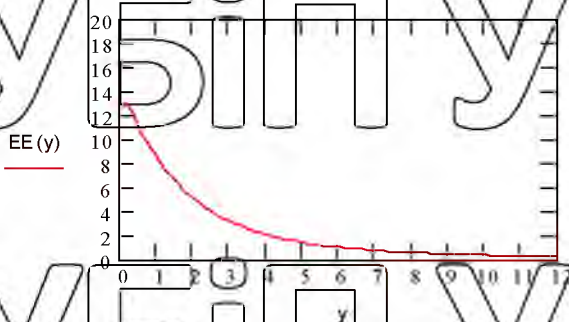
НУБІП України

$$E_{\text{стину}}(x, y) = \sum_m E_m(x, y) \quad (3.19)$$

Відповідно, в середовищі Mathcad маємо

$$EE(y) = EE1(y) + EE2(y) + EE3(y) + EE4(y) + EE5(y)$$

НУБІП України



НУБІП України

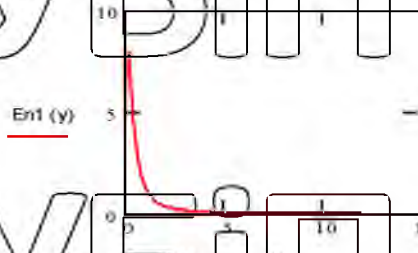
Аналогічно проведемо обчислення просторової картини фітоспроміненості утвореної випромінюванням, відбитим від двох протилежних стін на робочу

горизонтальну поверхню теплиці

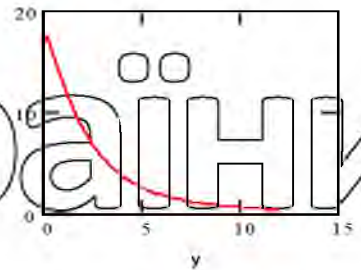
НУБІП України

Визначення світимості двох протилежних слів за методом Хигби-Левина

$$En1(y) := \frac{2 \cdot Kl \cdot e1}{\pi} \left(\operatorname{atan}\left(\frac{2.5 \cdot L}{y}\right) - \frac{y}{\sqrt{y^2 + h1^2}} \cdot \operatorname{atan}\left(\frac{2.5 \cdot L}{\sqrt{y^2 + h1^2}}\right) \right) \quad e := R$$

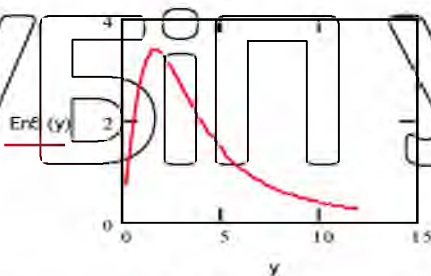


$$En5_1(y) := \frac{2 \cdot Kl \cdot e5}{\pi} \left[\operatorname{atan}\left(\frac{2.5 \cdot L}{y}\right) - \frac{y}{\sqrt{y^2 + (h5)^2}} \cdot \operatorname{atan}\left(\frac{2.5 \cdot L}{\sqrt{y^2 + (h5)^2}}\right) \right]$$



$$En5_2(y) := \frac{2 \cdot Kl \cdot e5}{\pi} \left[\operatorname{atan}\left(\frac{2.5 \cdot L}{y}\right) - \frac{y}{\sqrt{y^2 + (h4)^2}} \cdot \operatorname{atan}\left(\frac{2.5 \cdot L}{\sqrt{y^2 + (h4)^2}}\right) \right]$$

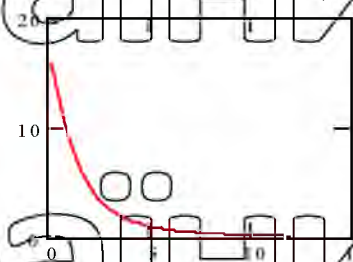
$$En5(y) := En5_1(y) - En5_2(y)$$



НУБІП УКРАЇНИ

НУБІП України

$$En4_1(y) := \frac{3 \cdot Kl \cdot e4}{\pi} \left[\operatorname{atan} \left(\frac{2.5 \cdot L}{y} \right) - \frac{y}{\sqrt{y^2 + (h4)^2}} \cdot \operatorname{atan} \left[\frac{2.5 \cdot L}{\sqrt{y^2 + (h4)^2}} \right] \right]$$



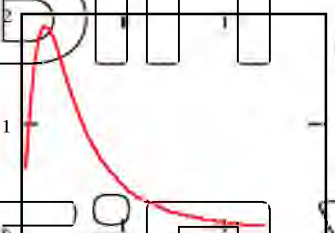
НУБІП України

$$En4_2(y) := \frac{2 \cdot Kl \cdot e4}{\pi} \left[\operatorname{atan} \left(\frac{2.5 \cdot L}{y} \right) - \frac{y}{\sqrt{y^2 + (h3)^2}} \cdot \operatorname{atan} \left[\frac{2.5 \cdot L}{\sqrt{y^2 + (h3)^2}} \right] \right]$$

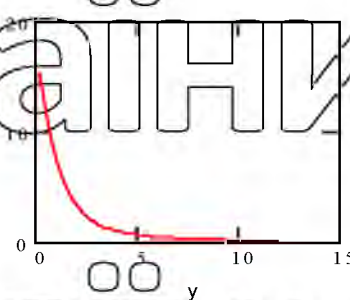
НУБІП України

$$En4(y) := En4_1(y) - En4_2(y)$$

En4(y)



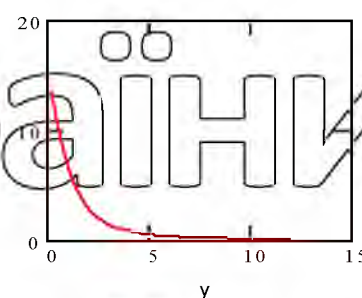
En4_2(y)



НУБІП України

$$En3_1(y) := \frac{2 \cdot Kl \cdot e3}{\pi} \left[\operatorname{atan} \left(\frac{2.5 \cdot L}{y} \right) - \frac{y}{\sqrt{y^2 + (h3)^2}} \cdot \operatorname{atan} \left[\frac{2.5 \cdot L}{\sqrt{y^2 + (h3)^2}} \right] \right]$$

НУБІП України



НУБІП України

$$En2(y) := En3_1(y) - En2_2(y)$$

En2(y)



НУБІП України

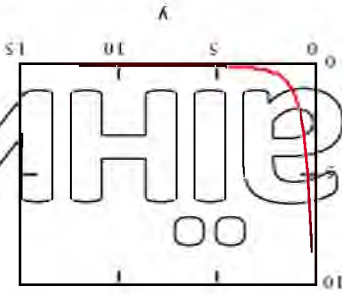
НУБ! П!ЯНН



НУБ! П!ЯНН

$$En_2(y) = \frac{2 \cdot K_1 \cdot e_2}{2.5 \cdot L} \left[\frac{y}{2.5 \cdot L} - \frac{\sqrt{y^2 + (h_2)^2}}{y} \cdot \operatorname{atan} \left(\frac{\sqrt{y^2 + (h_1)^2}}{2.5 \cdot L} \right) \right]$$

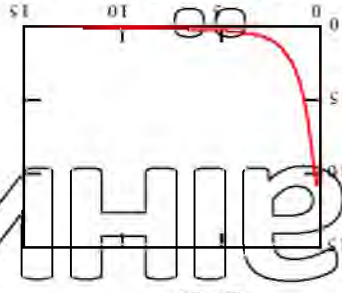
НУБ! П!ЯНН



НУБ! П!ЯНН

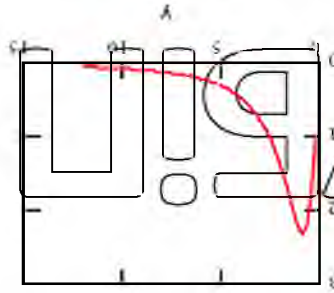
$$En_2(y) = \frac{2 \cdot K_1 \cdot e_2}{2.5 \cdot L} \left[\frac{y}{2.5 \cdot L} - \frac{\sqrt{y^2 + (h_2)^2}}{y} \cdot \operatorname{atan} \left(\frac{\sqrt{y^2 + (h_1)^2}}{2.5 \cdot L} \right) \right]$$

НУБ! П!ЯНН



$$En_1(y) = \frac{2 \cdot K_1 \cdot e_2}{2.5 \cdot L} \left[\frac{y}{2.5 \cdot L} - \frac{\sqrt{y^2 + (h_2)^2}}{y} \cdot \operatorname{atan} \left(\frac{\sqrt{y^2 + (h_2)^2}}{2.5 \cdot L} \right) \right]$$

НУБ! П!ЯНН



НУБ! П!ЯНН

$$En_2(y) = \frac{2 \cdot K_1 \cdot e_2}{2.5 \cdot L} \left[\frac{y}{2.5 \cdot L} - \frac{\sqrt{y^2 + (h_2)^2}}{y} \cdot \operatorname{atan} \left(\frac{\sqrt{y^2 + (h_2)^2}}{2.5 \cdot L} \right) \right]$$

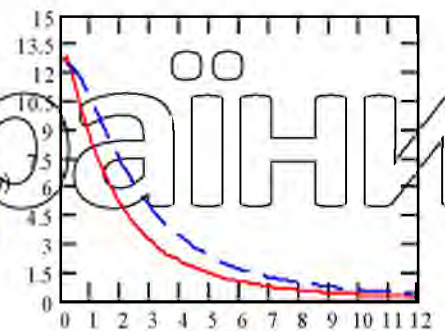
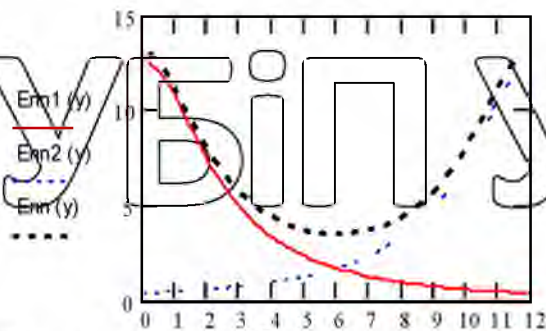
При виконанні умови $A/B \geq 5$ (де A і B відповідно довжина і ширина приміщення, м) достатньо врахувати потік, відбитий лише від поздовжніх стін. Визначаємо опроміненість у точці на розрахунковій поверхні, утворену відбитим від обох стін фотосинтезним потоком, за формулою:

$$E_{\text{стін}}(x, y) = E_{\text{стінліва}}(x, y) + E_{\text{стінправа}}(x, B - y). \quad (3.20)$$

Визначення сумарної освітленості підлоги від світлового потоку відбитого протилежними стінами

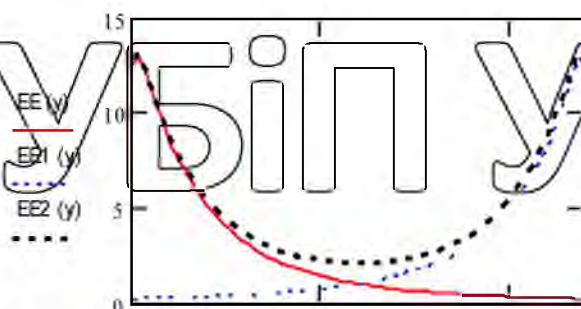
$$E_{\text{стін}}(y) := E_{\text{стін1}}(y) + E_{\text{стін2}}(y) + E_{\text{стін3}}(y) + E_{\text{стін4}}(y) + E_{\text{стін5}}(y)$$

$$E_{\text{стін2}}(y) := E_{\text{стін1}}(y - 12) \quad E_{\text{стін}}(y) := E_{\text{стін1}}(y) + E_{\text{стін2}}(y)$$



$$EE(y) = 12.573 \quad EE(12) = 0.217$$

$$EE1(y) := EE(y - 12) \quad EE2(y) := EE1(y) + EE(y)$$



НУБІП України

$$E_{\text{тот}}(x, y) = E_{\text{пр}}(x, y) + E_{\text{с1}}(y) + E_{\text{с2}}(y) \quad x = 10, 10.5, 11$$

Нижче наведено фрагмент картини ізофит на розрахунковій поверхні

виробничого приміщення, що утворена фотосинтезним потоком відбитим від стін (зверху і знизу бічні стіни теплиці)

НУБІП України

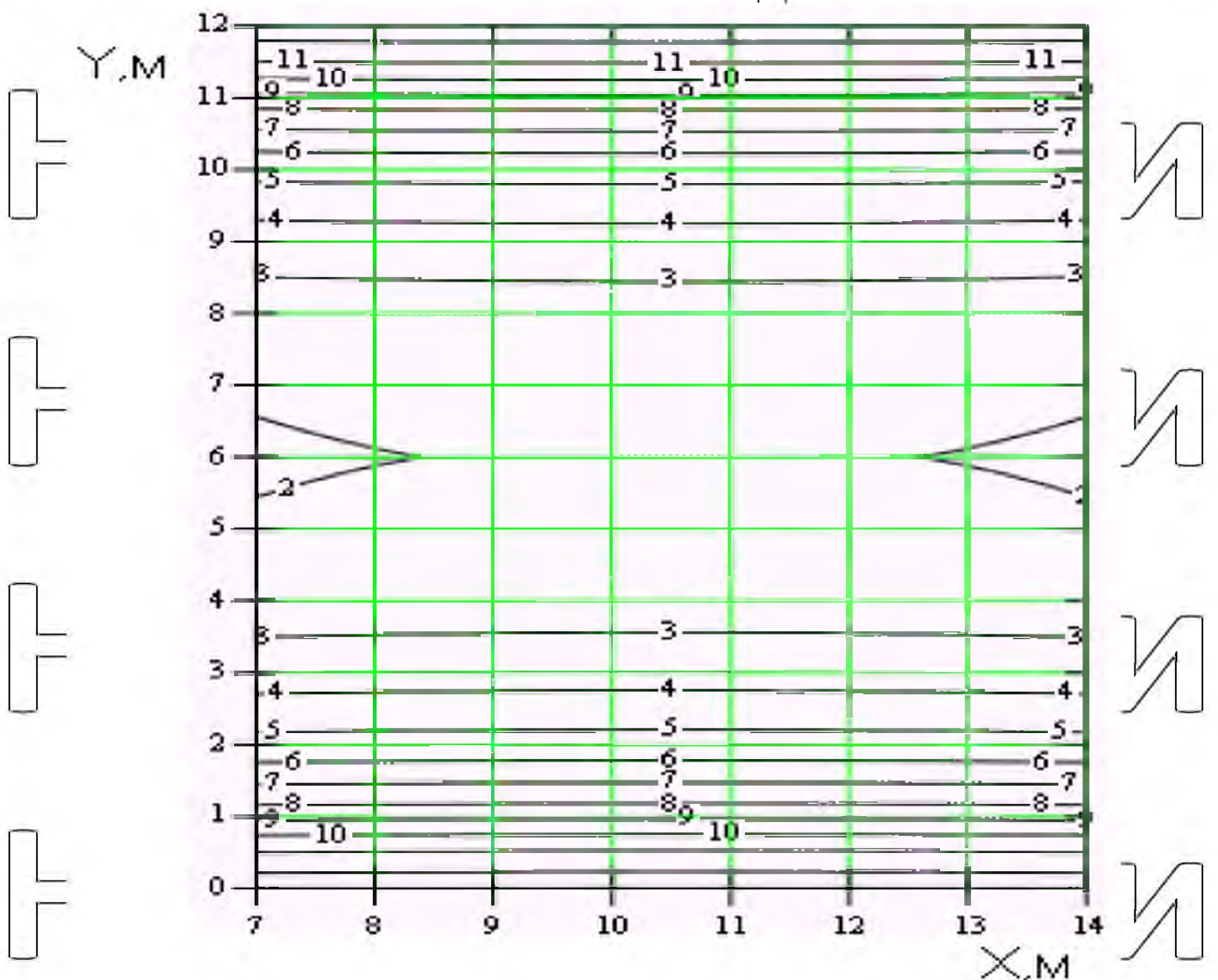


Рис. 3.10) Розподіл ізофит опроміненості горизонтальної робочої поверхні теплиці від відбитого стінами випромінювання.

НУБІП України

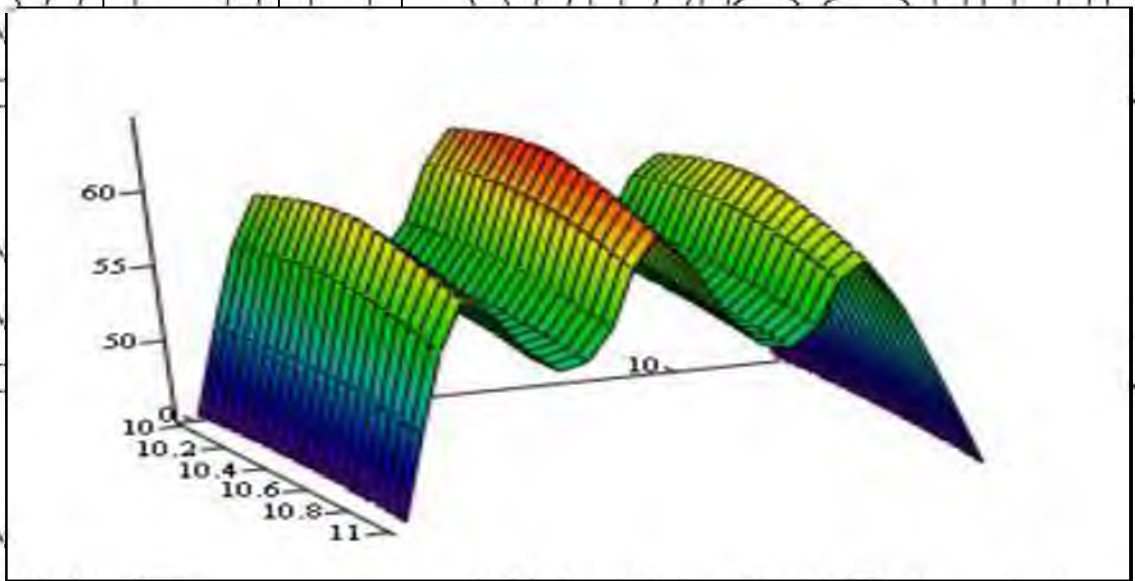


Рис. 3.11. Картина ізопіт на горизонтальній розрахунковій поверхні виробничого приміщення теплиці, що утворена сумарним фотосинтезним потоком відбитим від стін та від світильників.

У загальному випадку опроміненість та коефіцієнт відбиття стіни є функції координат $-E_c(x, y), R_c(x, y)$. Тому опроміненість розрахункової поверхні виробничого приміщення теплиці, яка утворена світловим

потокom відбитим від стіни, можна розрахувати за спрощеною формулою (якщо стіну розглядати, як суцільний простий нерівномірний світильник):

$$E_{\text{стінки}}(x, y) = \frac{1}{4} \cdot \int_0^L \int_0^H \frac{E_c(x, z) \cdot R_c(x, z) \cdot z \cdot \sqrt{(X-x)^2 + y^2}}{[(X-x)^2 + y^2 + z^2]^{3/2}} dx \cdot dz, \quad (3.21)$$

де H – відстань від стелі до підлоги, м;

L – відстань між світильниками, м;

$R_c(x, y)$ – коефіцієнт відбиття стіни;

x, y, z – поточні координати точки.

НУБІП УКРАЇНИ

Освітненість E на розрахунковій поверхні створену відбитим потоком від двох стін, розрахована за формулою (2.2.10) має вигляд

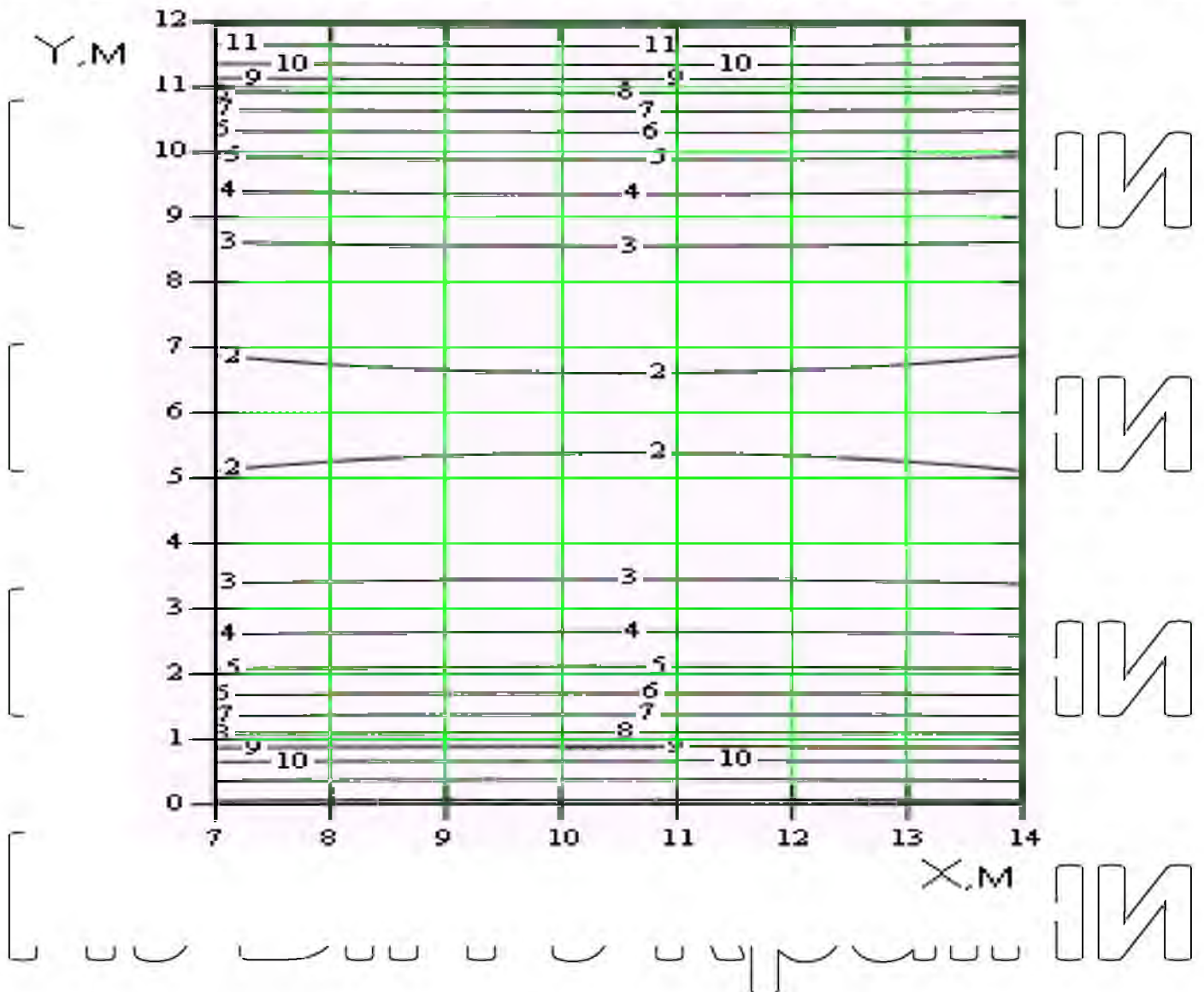


рис. 3.12 Картина ізолікс, утворена світловим потоком відбитим від стін, розрахована з використанням поліноміальної регресії

Картина ізолікс, яка розрахована з урахуванням розподілу освітленості на стіні та коефіцієнту відбиття, як функції координат, показана на рис. 3.12 дещо відрізняється від картини на рис. 3.10. Цей метод дозволяє отримати більш точну картину ізолікс на робочій поверхні

НУБІП УКРАЇНИ

виробничого приміщення, крім того значно прискорюється процес розрахунку.

Опроміненість поверхні стелі $E_{ст}(x, y)$, що утворена відбитим від стін світловим потоком, розраховується за такою самою методикою з використанням поліноміальної регресії. Фрагмент картини ізодит на поверхні стелі показано на рис. 3.13.

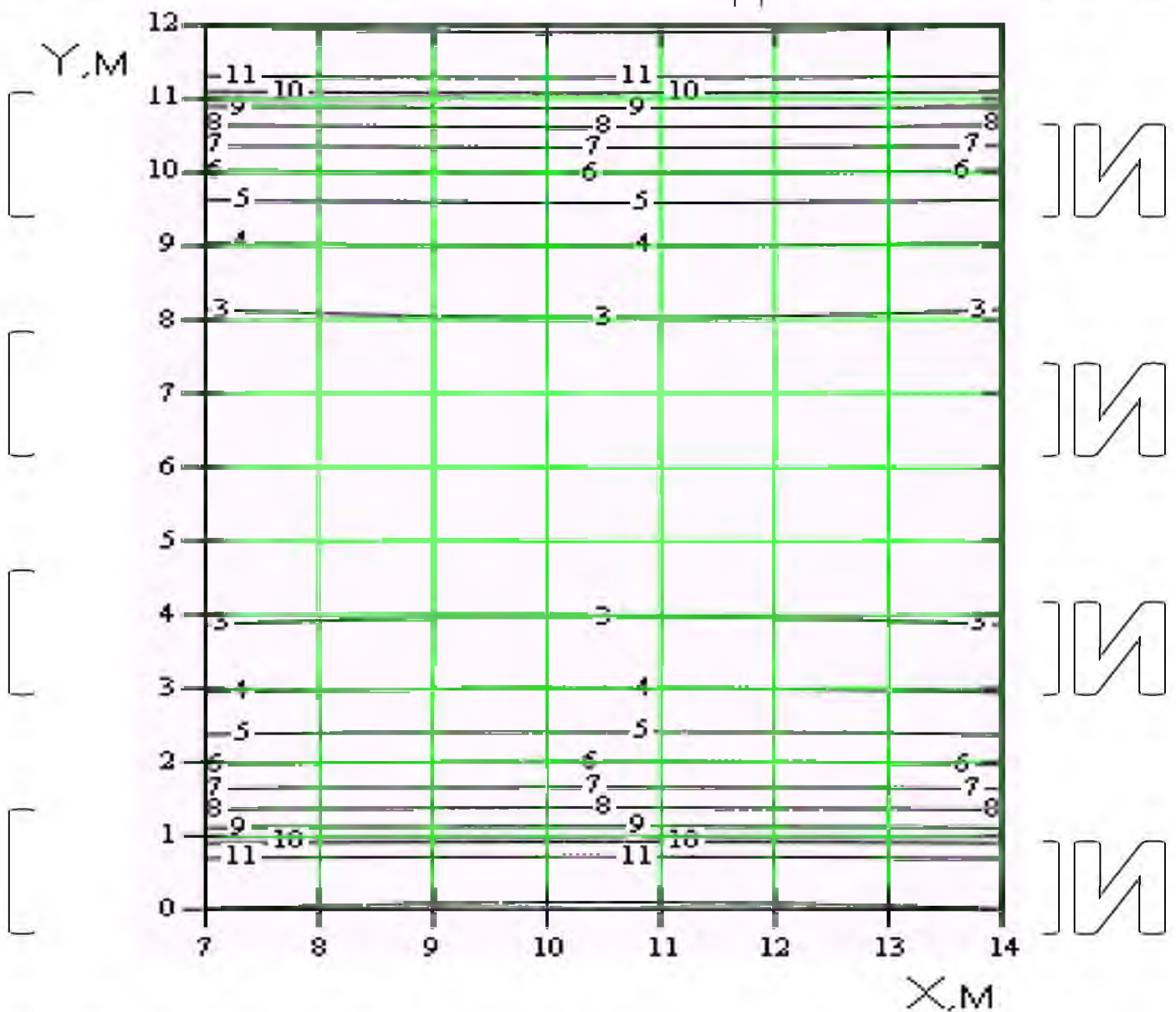


Рис. 3.13 Фітодпроміненість стелі, утворена потоком відбитим від стін.

Опроміненість на горизонтальній розрахунковій поверхні теплиці, яка утворена фотосинтезним потоком, відбитим від стелі можна розрахувати за формулою (2.2.15),

$$E_{стелі}(x, y) = \frac{1}{\pi} \int_0^{B/2} \int_0^{L/2} \frac{E_{см}(x, y) \cdot R_{см}(x, y) \cdot H^2}{[(X-x)^2 + (Y-y)^2 + H^2]^{3/2}} \cdot dx dy, \quad (3.22)$$

де $R_{см}(x, y)$ - коефіцієнт відбиття фотосинтезного потоку від стелі;

x, y - поточні координати точки;

H - відстань від стелі до підлоги, м;

$E_{см}(x, y)$ - освітленість, утворена потоком відбитим від стелі, фт/м²

L - відстань між світильниками, м;

B - ширина приміщення, м.

Визначення світлового потоку відбитого від стелі

р - стеля

hp1 := 1.15

hp2 := 1.6

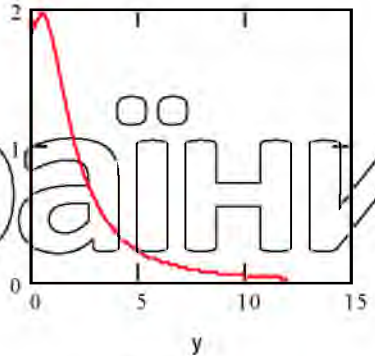
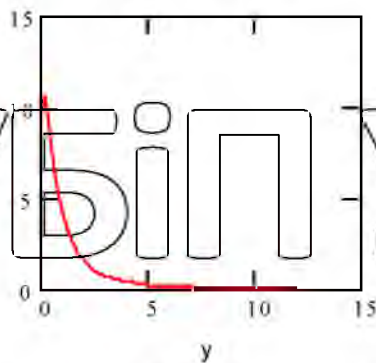
hp3 := 2.05

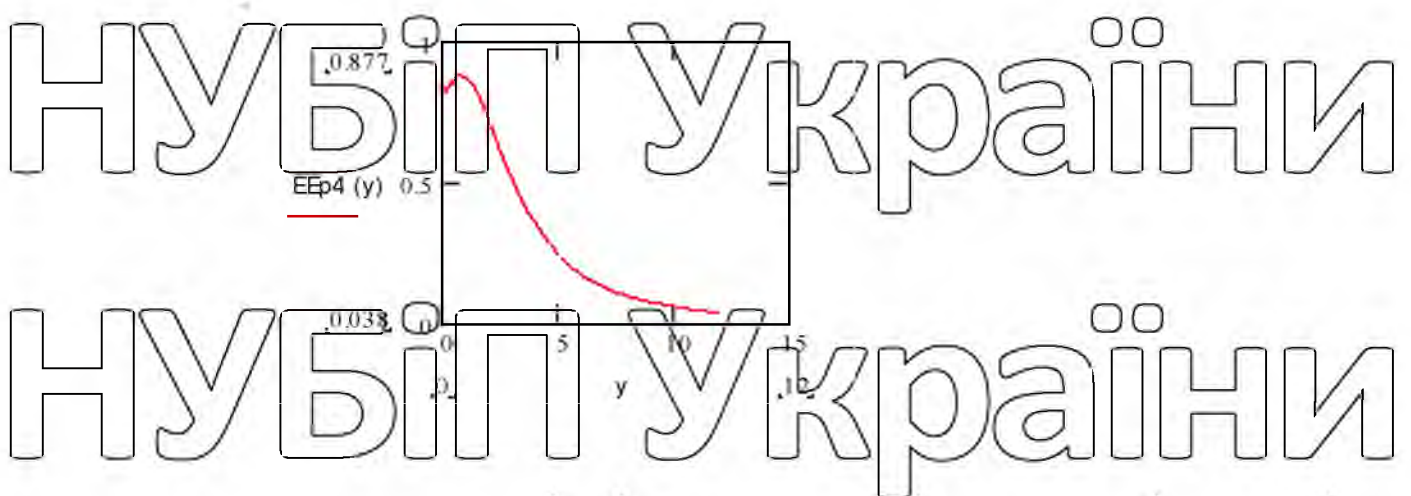
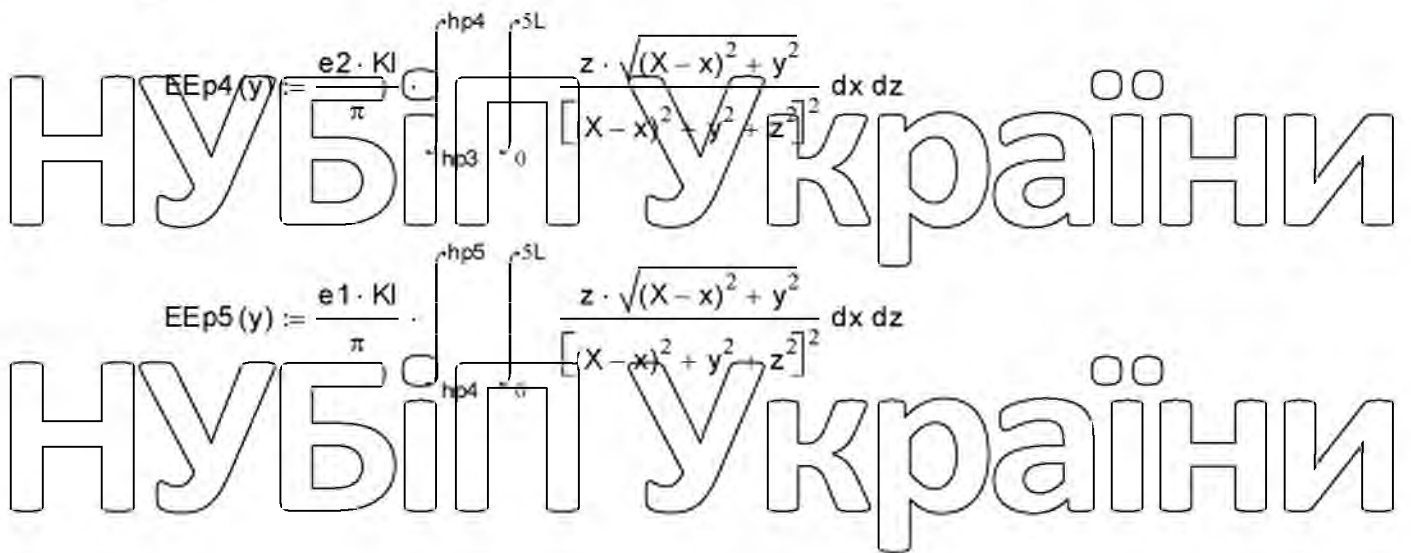
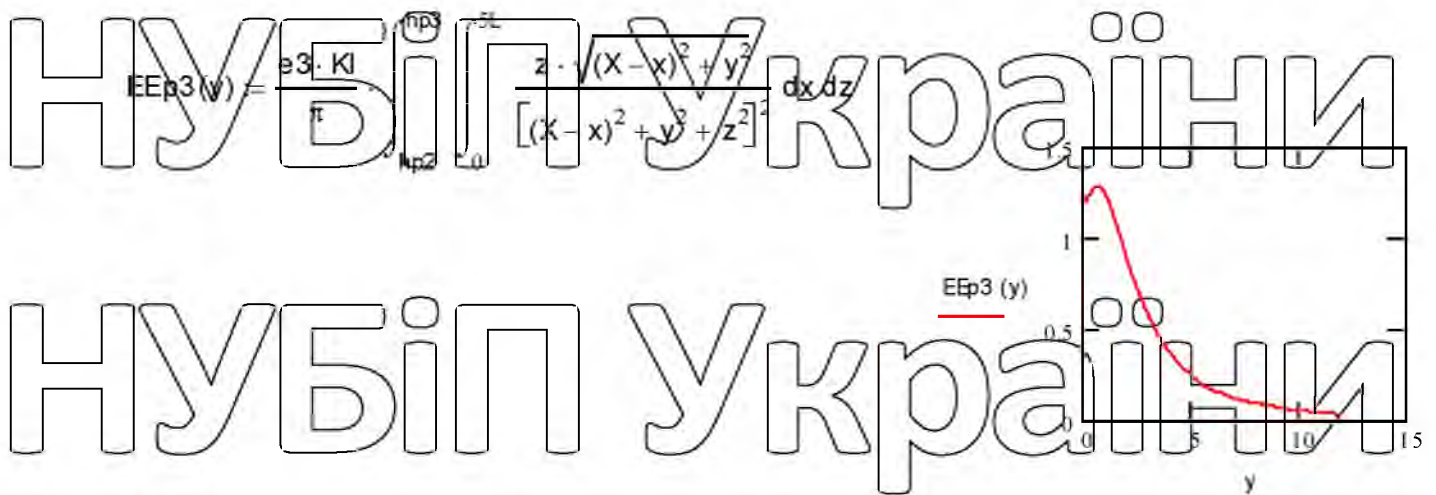
hp4 := 2.5

hp5 := 11

$$EEp1(y) := \frac{e5 \cdot Kl}{\pi} \cdot \frac{z \cdot \sqrt{(X-x)^2 + y^2}}{[(X-x)^2 + y^2 + z^2]^2} dx dz$$

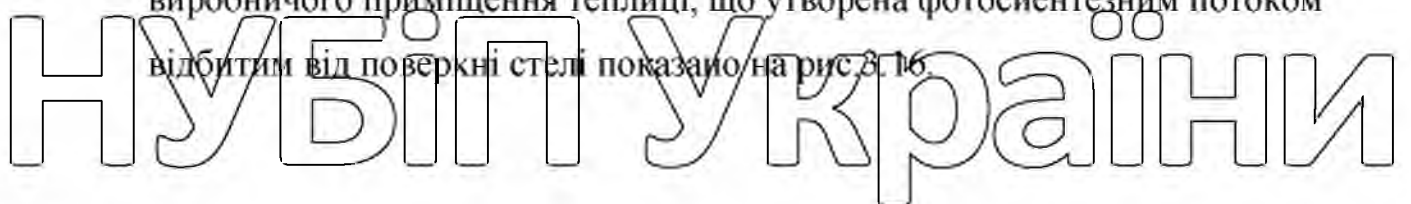
$$EEp2(y) := \frac{e4 \cdot Kl}{\pi} \cdot \frac{z \cdot \sqrt{(X-x)^2 + y^2}}{[(X-x)^2 + y^2 + z^2]^2} dx dz$$





Фрагмент картини ізопіт на горизонтальній розрахунковій поверхні

виробничого приміщення теплиці, що утворена фотосинтезним потоком відбитим від поверхні стелі показано на рис.3.16.



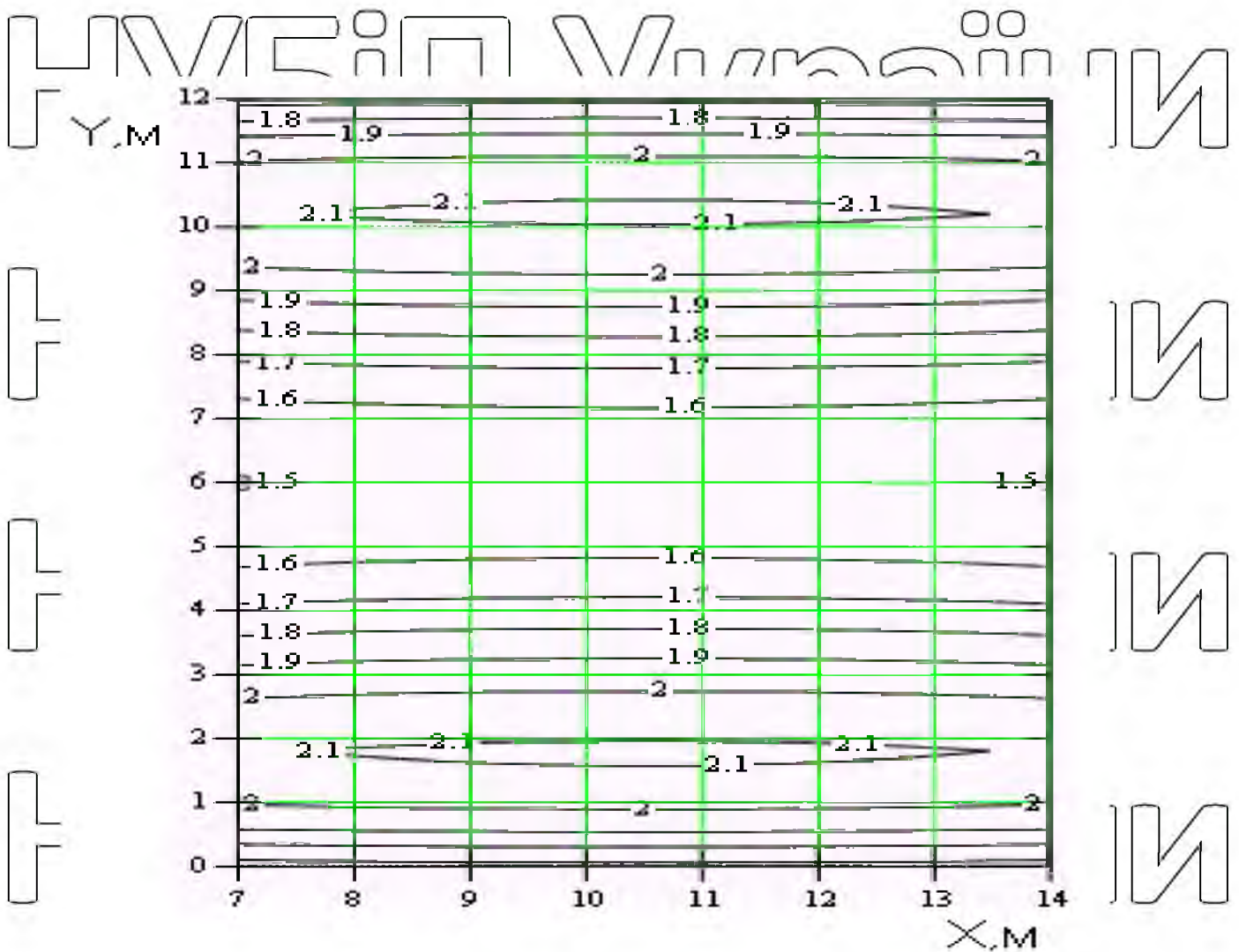


Рис. 3.14. Картина ізопіт на робочій поверхні теплиці утворена фотосинтезним потоком відбитим від стелі.

В розрахунках не враховується фотосинтезний потік відбитий від ґрунту та розсіяний рослинами, тому що у, він не має суттєвого значення.

Загальна фітоопроміненість з урахуванням прямого і відбитих складових потоку випромінювання від світильників розраховується за формулою (3.22):

$$E(x, y) = \frac{F}{1000} \sum_n \frac{Z_n \cdot I_{\alpha_n}}{\left[Z_n^2 + (x - X_n)^2 + (y - Y_n)^2 \right]^{3/2}} \arccos \frac{Z_n}{\sqrt{Z_n^2 + (x - X_n)^2 + (y - Y_n)^2}} + \frac{1}{\pi} \cdot \int_0^H \int_0^L \frac{E_c(x, z) \cdot R_c(x, z) \cdot z \cdot \sqrt{(X-x)^2 + y^2}}{\left[(X-x)^2 + y^2 + z^2 \right]^2} dx \cdot dz$$

$$\frac{1}{\pi} \cdot \int_0^B \int_0^L \frac{E_{cm}(x, y) \cdot R_{cm}(x, y) \cdot H^2}{\left[(X-x)^2 + (Y-y)^2 + H^2 \right]^2} dx dy \quad (2.35)$$

де F – фотосинтезний потік лампи, фт;

X_n, Y_n, Z_n – координати світильників у просторі;

x, y, z – поточні координати точки;

H – відстань від стелі до підлоги, м;

L – відстань між світильниками, м;

$R_c(x, y)$ – коефіцієнт відбиття стіни;

B – ширина приміщення, м;

1000 – коефіцієнт переведу в міліфт

$E_{cm}(x, y)$ – опроміненість, утворена потоком відбитим від стелі;

$R_{cm}(x, y)$ – коефіцієнт відбиття потоку від стелі.

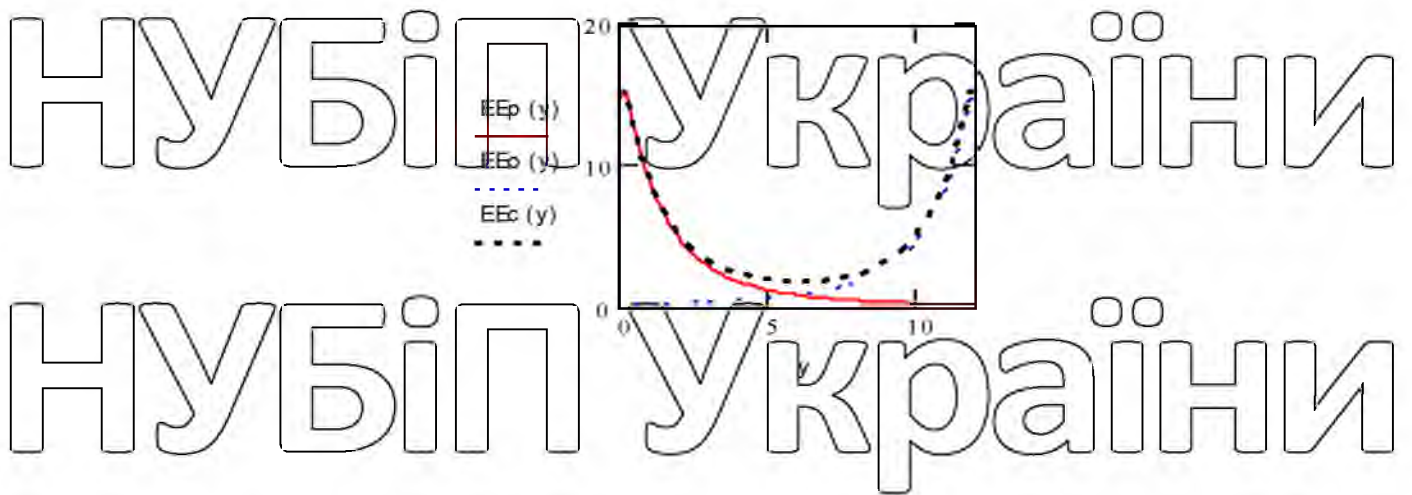
Отже, використовуючи програмне середовище Mathcad визначасмо загальну фактичну опроміненість робочої поверхні теплиці за вище наведеним виразом:

НУБІП України

НУБІП України

$EE_p(y) := EE_{p1}(y) + EE_{p2}(y) + EE_{p3}(y) + EE_{p4}(y) + EE_{p5}(y)$
 $EE_o(y) := EE_p(y - 12)$
 $EE_e(y) := EE_p(y) + EE_o(y)$

НУБІП України



Фрагмент загальної картини ізофіт на розрахунковій поверхні

показано на рис. 3.15

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

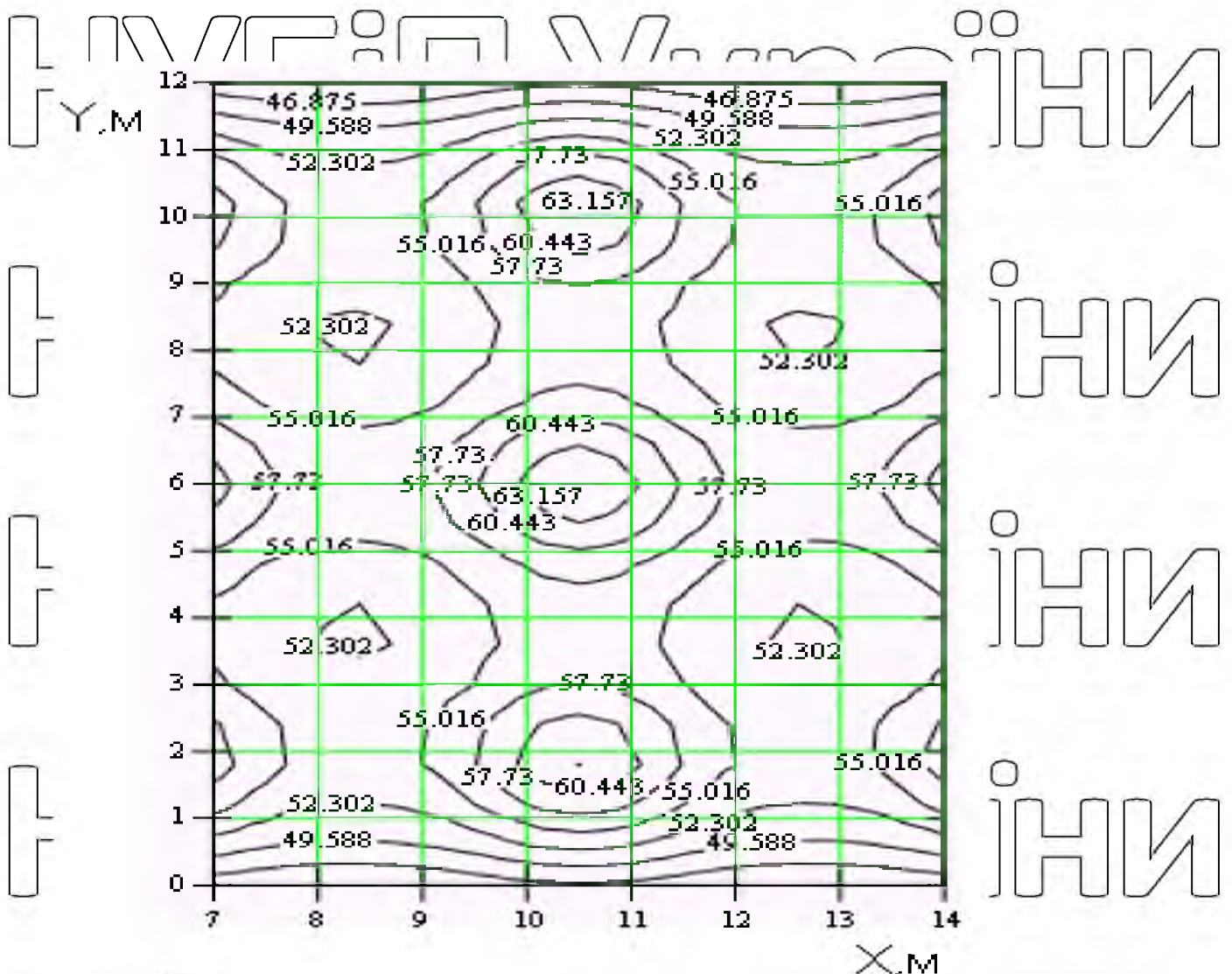


Рис. 3.15. Фрагмент картини ізофіт на розрахунковій поверхні теплиці

Висновки до розділу.

1. Запропонований метод дозволяє визначити реальне значення горизонтальної опроміненості на заданому рівні з урахування особливостей коефіцієнту відбивання фотосинтезного випромінювання поверхнями бічних стін та стелі приміщення теплиці як функції просторових координат.

2. Використання даного методу, в порівнянні з відомими методами визначення опроміненості на заданій поверхні, при проектуванні опромінювальних систем забезпечить зменшення витрат електроенергії за

рахунок використання джерел меншої потужності та надасть можливість більш ефективного автоматичного регулювання заданого рівня фотосинтезної опроміненості в процесі вирощування рослин.

Н

Д

Н

Д

Н

Д

Н

Д

Н

Д

НУДІІ | РОЗДІЛ 4 | УКРАЇНИ

РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ УЗГОДЖЕННЯ СПЕКТРУ ВИПРОМІНЮВАННЯ ДЖЕРЕЛА ЗІ СПЕКТРОМ ФОТОСИНТЕЗНОЇ ДІЇ.

У зв'язку з сучасною проблемою - необхідністю розширення площ під світлокультуру рослин значно збільшується потреба в джерелах випромінювання, що мають високу біологічну фотосинтезну ефективність. Для виконання цього завдання необхідний випуск спеціальних рослинницьких ламп, що мають не тільки високий світловий ККД, а й сприятливий для рослин спектральний склад. Висока біологічна і енергетична ефективність джерел штучного світла в кінцевому рахунку визначить економічний ефект світлокультури рослин і надасть можливість більш широкого їх використання в тепличних господарствах нашої країни.

Багаторічними дослідженнями фотосинтезної дії оптичного випромінювання вченими різних країн світу визначено усереднений спектр фотосинтезу. Зоврема, приведений на рис.4.1

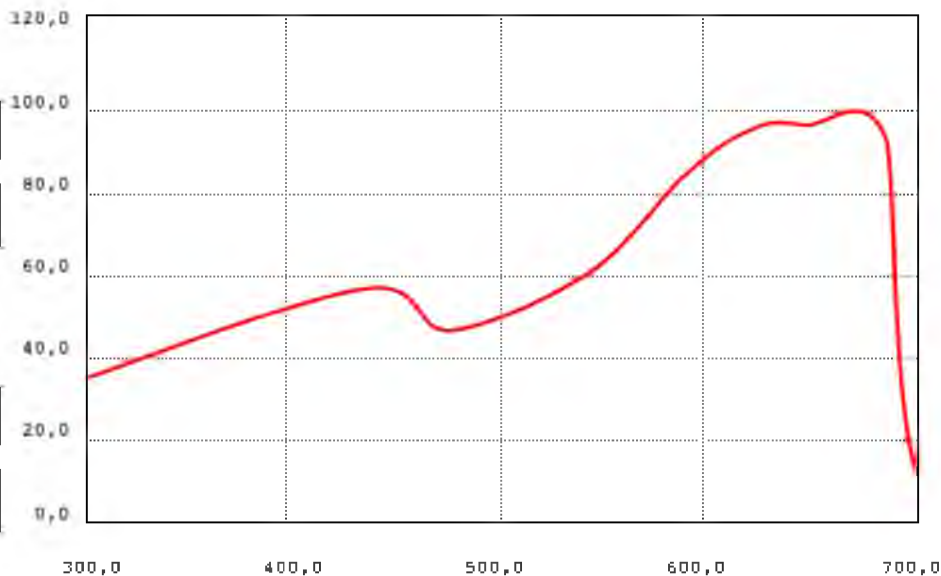


Рис.4.1. Усереднений спектр дії фотосинтезу у зелених рослин [McCree, 1972a]

Якщо дану залежність апроксимувати, то залежність може бути представлена у вигляді рівняння:

$$g(\lambda) = 1,28 \cdot \cos(0,005 \cdot \lambda)^2 \cdot \cos(0,63 + \sin(2,21 \cdot \sin(0,009 \cdot \lambda + 0,45 \cdot \sin(0,09 \cdot \lambda)) \times \cos(0,63 + 1,66 \cdot \sin(0,009 \cdot \lambda))))^2 \cdot \cos(0,63 \lambda + 1,66 \cdot \sin(0,009 \lambda)), \quad (3.1)$$

де, λ – довжина хвилі випромінювання в нм (380нм до 700нм)
 $g(\lambda)$ – спектральна ефективність фотосинтезу

Штучні джерела оптичного випромінювання необхідно створювати такими, щоб вони мали аналогічний спектр випромінювання чи близький по формі до даної залежності.

Визначимо основні оптимізаційні вимоги до джерел з використанням методичного підходу В.А. Соколова [].

Для оптимізації штучного джерела повинно виконуватися дві основні умови:

1. Частка збігу спектрального розподілу джерела світла з функцією заснованою на спектрі дії фотосинтезу повинна прагнути до одиниці.

2. Загальна оптична потужність світлодіодного світильника (інтенсивність опромінення) повинна знаходитися в діапазоні від 5 до 100 Вт/м² ФАР.

Виходячи звищенаведеного, можна визначити фотосинтезну ефективність опромінювача (світильника) за виразом 2.3.2.

$$f_{opr} = \frac{\int_{\lambda=380}^{\lambda=750} \varphi(\lambda) \cdot K(\lambda)_{\phi} \cdot d(\lambda)}{\int_{\lambda=380}^{\lambda=750} g(\lambda) d\lambda} \quad (4.2).$$

f_{opr} – ефективність опромінювача, (близька до одиниці).

$\int_{\lambda=380}^{\lambda=750} \varphi(\lambda) \cdot K(\lambda)_{\phi} \cdot d(\lambda)$ – сумарне значення спектрального розподілу енергії джерела світла в відносних одиницях в спектральному діапазоні ФАР,

$$\int_{\lambda=380}^{\lambda=750} g(\lambda) \cdot d(\lambda)$$
 - сумарне значення спектрального розподілу функції заснованої на спектрі дії фотосинтезу в відносних одиницях

З даного виразу видно що, чим вище співпадання спектру випромінювання джерела із спектром фотосинтезної дії тим ефективніше джерело світла для фотосинтезу, а величина коефіцієнту $f_{\text{опр}}$ ближче до одиниці. Спробуємо створити ефективний опромінювач на основі світлодіодних джерел оптичного випромінювання

Сучасні світлодіоди різних кольорів світіння 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 в захищеному ґрунті. Для мінімізації кількості кольорів світлодіодів визначимо оптимальний спектр штучного джерела світла.

Розглянемо різні світлодіоди і апроксимуємо їх спектральні характеристики на основі паспортних даних. На рис. 2.3.2. показано спектральні характеристики випромінювання основних світлодіодних випромінювачів: синього, зеленого і червоного:

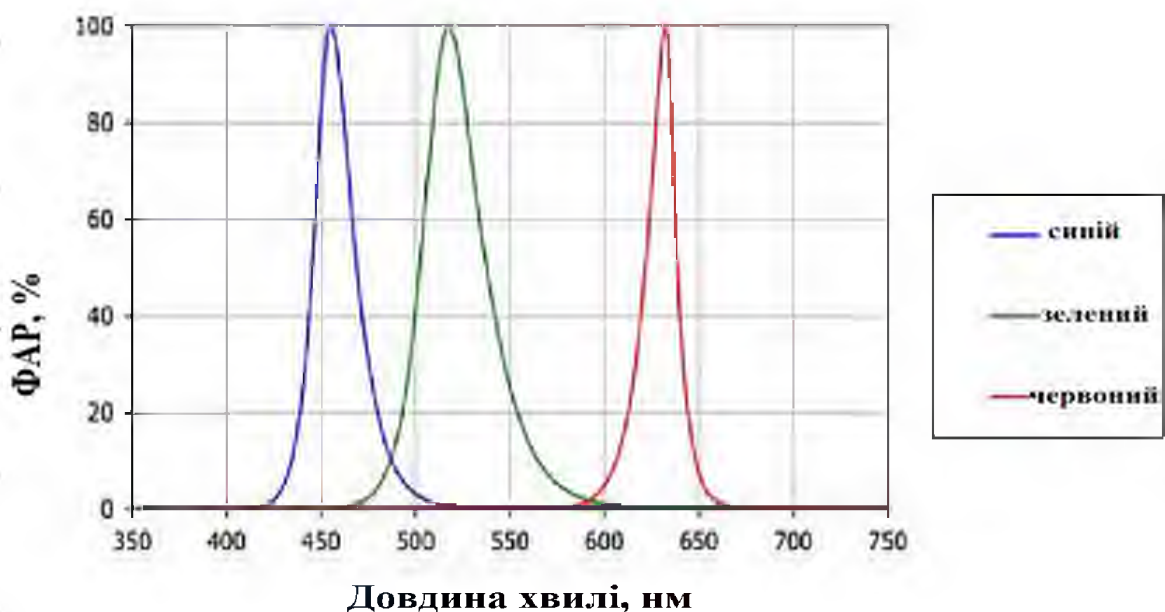


Рис.4.2. Спектри випромінювання основних світлодіодів.

Після математичної обробки кривих отримали наступні функції розподілу спектральної щільності випромінювання:

Для червоного світлодіода отримана функція спектральної щільності випромінювання має вигляд (похибка апроксимації 0,044):

$$\varphi_{\text{черв}}(\lambda) = 0,000492 + \frac{2,12 \times \cos(107\lambda) - 0,0322\lambda}{1,26 \times 10^3 \lambda + 133 \cos(6,11 - 0,115\lambda) - 3,95 \times 10^5 - \lambda^2} - 2,16 \times 10^{-6} \lambda \quad (4.4)$$

Для синього світлодіода вираз має вигляд (похибка апроксимації 0,031):

$$\varphi_{\text{син}}(\lambda) = \frac{2,19 \times 10^8 \lambda^4}{7,74 \times 10^8 \lambda + 2,1 \times 10^4 \lambda^2 + 0,0159 \lambda^4 - 6,58 \times 10^6 \lambda - 29,8 \lambda^3} - 6,02 \times 10^{-5} \quad (4.5)$$

Для зеленого світлодіода рівняння кривої має вигляд (похибка апроксимації 0,054)

$$\varphi_{\text{зел}}(\lambda) = \frac{151 + 180 \sin^2(0,0318\lambda)}{2,71 \times 10^5 + \lambda^2 - 1,04 \times 10^3 \lambda} - 0,00364 - 0,0048 \sin(0,0322\lambda) \quad (4.6)$$

При використанні в опромінювачах світлодіодів з короткохвильовим фіолетовим випромінюванням (див. рис. 4.2) має наступне рівняння апроксимації кривої (похибка апроксимації 0,024)

$$\varphi_{\text{фіол}}(\lambda) = \frac{\lambda}{1,76 \times 10^9 \lambda + 6,63 \times 10^4 \lambda^2 + 0,00693 \lambda^4 - 1,76 \times 10^7 \lambda - 111 \lambda^3} \quad (4.7)$$

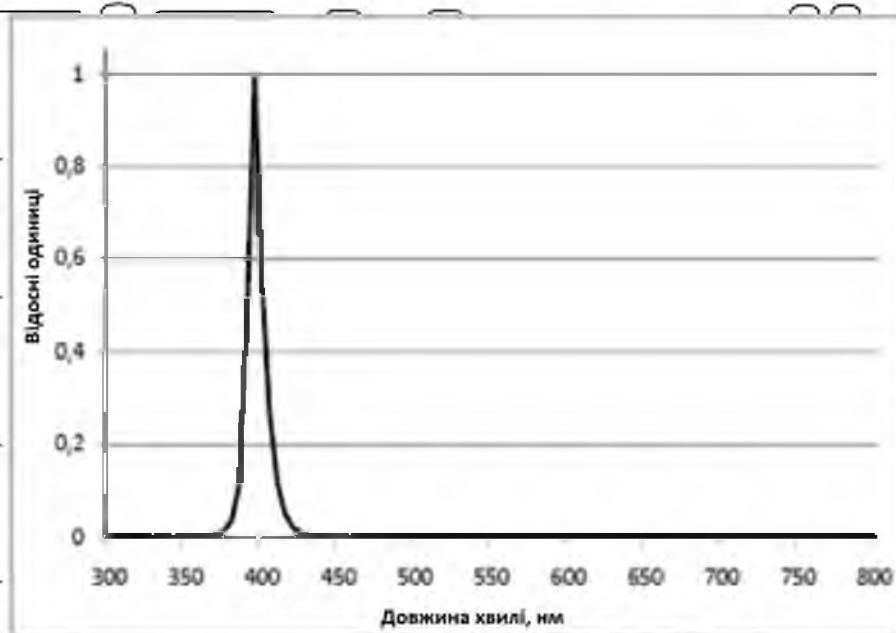


Рис. 4.3. Спектр випромінювання фіолетового світлодіода

Для оранжевого світлодіода відповідні спектральна характеристика (рис.2.3.4) і апроксимаційна залежність (похибка апроксимації 0,04%)

наведені нижче

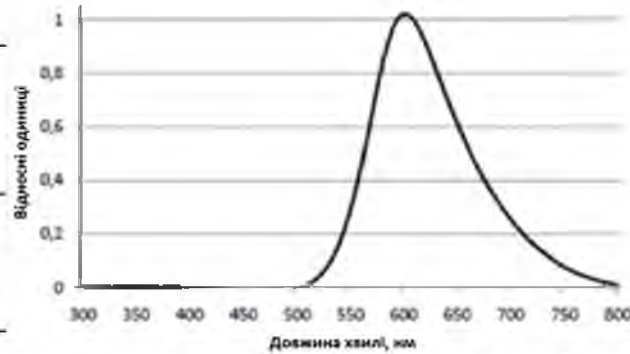


Рис. 4.4 Спектр випромінювання оранжевого світлодіода.

$$\varphi_{\text{оранж}}(\lambda) = \frac{2,17 \cos(2,4 + 0,0063\lambda)^2 \cos(1,5 + 0,0063\lambda)}{2,66 \times 10^3 - 2,25 \times 10^3 \cos(5,68 + 0,0118\lambda)}$$

$$\frac{4,59 \cos(2,4 + 0,0063\lambda)^2 \cos(1,53 + 0,0063\lambda)}{2,66 \times 10^3 - 2,23 \times 10^3 \cos(5,68 + 0,0118\lambda)} \quad (4.8)$$

Розглянемо побудову та ефективність універсального світлодіодного опромінювача на базі вищенаведених світлодіодів.

Розглянемо опромінювач, побудований на основі фіолетового, синього, зеленого і червоного світлодіодів і порівняємо його сумарний спектр із спектром фотосинтезу (рис.2.3.5)

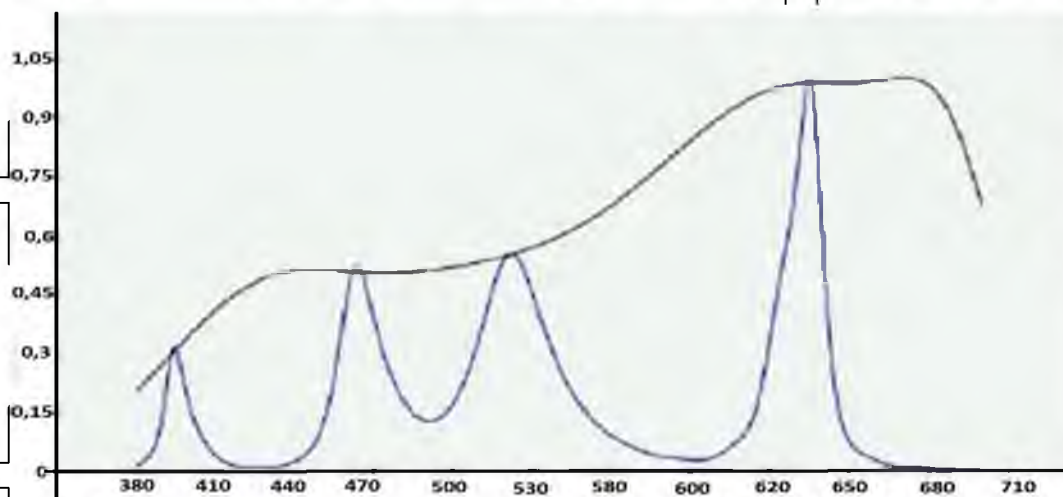


Рис 4.5. Порівняння спектру комбінованого світлодіодного світильника і спектра фотосинтезної дії

Математична модель комбінованого спектру має наступний вигляд

$$\varphi_{\text{комб}}(\lambda) = K_{\text{черв}} \times \varphi_{\text{черв}}(\lambda) + K_{\text{син}} \times \varphi_{\text{син}}(\lambda) + K_{\text{зел}} \times \varphi_{\text{зел}}(\lambda) + K_{\text{фіол}} \times \varphi_{\text{фіол}}(\lambda) \quad (4.9)$$

Де K - відносні коефіцієнти максимальної фотосинтезної ефективності для кожного світлодіода становлять, відповідно:

$$K_{\text{черв}} = g_{\text{черв}} \max(\lambda) = 1, \quad K_{\text{син}} = g_{\text{син}} \max(\lambda) = 0,511$$

$$K_{\text{зел}} = g_{\text{зел}} \max(\lambda) = 0,55, \quad K_{\text{фіол}} = g_{\text{фіол}} \max(\lambda) = 0,31,$$

Процентне співвідношення співпадання випромінювання від світлодіодів із спектром фотосинтезної чутливості визначимо за виразом

$$\eta_{\text{комб}} = \frac{\int_{\lambda=380}^{\lambda=750} \varphi_{\text{комб}}(\lambda) d(\lambda)}{\int_{\lambda=380}^{\lambda=750} \varphi_{\text{фотосин}}(\lambda) d(\lambda)} = \frac{125,02}{216,687} = 0,577 \quad (4.10)$$

Висновки до розділу 4.

Аналізуючи вище приведене, можна зробити наступні висновки:

1. Сучасна база промислового виробництва світлодіодних джерел оптичного випромінювання дозволяє розробити світильник (опромінювач) із заданим спектром випромінювання максимально наближеним до усередненої кривої спектру ефективного поглинання усередненого листа рослини.

2. Опромінювач, побудований на основі комплекту із світлодіодів із різним спектральним складом випромінювання дозволяє змінювати спектральний склад випромінювання, шляхом комбінації ввімкнених світлодіодів, що дає можливість встановлювати рекомендовану ефективну інтенсивність і спектральний склад випромінювання протягом зростання рослини у відповідності до фази її розвитку.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

ВИСНОВКИ

У магістерській роботі вирішено актуальну і важливу науково-прикладну задачу підвищення урожайності овочевих культур шляхом обґрунтування і розробки показників та режимів нормування штучного опромінення рослин при їх вирощуванні в теплицях.

У результаті досліджень отримано наступні результати:

1. Запропоновано метод розрахунку фактичної опроміненості в заданій точці приміщення, який враховує фактичний стан коефіцієнту відбивання фотосинтезного випромінювання поверхнями бічних стін та стелі приміщення теплиці як функції просторових координат, що підвищує ефективність опромінення рослин.

НУБІП України

2. Використання даного методу, в порівнянні з відомими методами визначення опроміненості на заданій поверхні, при проектуванні опромінювальних систем забезпечить зменшення витрат електроенергії за рахунок використання ламп меншої потужності та надасть можливість більш ефективного автоматичного підтримання заданого рівня фотосинтезної опроміненості в процесі зростання рослин.

3. Обґрунтовано, що сучасна база промислового виробництва світлодіодних джерел оптичного випромінювання дозволяє розробити світильник (опромінювач) із заданим спектром випромінювання максимально наближеним до усередненої кривої спектру ефективного поглинання усередненого листа рослини.

4. Опромінювач, який буде побудований на основі комплекту із світлодіодів із різним спектральним складом випромінювання дозволяє змінювати спектральний склад випромінювання, шляхом комбінації ввімкнених світлодіодів, що дає можливість встановлювати рекомендовану ефективну інтенсивність і спектральний склад випромінювання протягом зростання рослини у відповідності до фази її розвитку.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Червинский Л.С. Обоснование влияния спектрального состава источников световой энергии на жизнедеятельность растений в сооружениях закрытого грунта / Червинский Л.С., Луцак Я.Н. // Теоретический и научно-практический журнал Всероссийского научно-исследовательского института электрификации сельского хозяйства «Инновации в сельском хозяйстве». – Москва: – ВИЭСХ. 2016 – Выпуск №4(9) – С. 180-187.
2. Червінський Л.С. Метод визначення просторової фотосинтезної опроміненості / Червінський Л.С., Усенко С.М., Книжка Т.С., Луцак Я.М.// Технічна електродинаміка/ Інст. Електродинаміки НАН України, №5 – 2016- м.Київ, С. 88-90.

3. Червінський Л.С. Обґрунтування енергоефективної системи світлодіодного опромінення тепличних рослин" /Книжка Т.С., Романенко О.І./ Науковий вісник НУБіП України. - 2017. - Вип.261. - С.128-134 /.

4. Червінський Л.С. Розробка узагальнюючої математичної моделі процесу вирощування овочів у теплиці для вирішення питання оптимізації процесу" Вісник ХНТУСГ ім. Петра Василенка , випуск 186, 2017, с.98-100

5. Червінський Л.С. Обґрунтування ефективного світлодіодного освітлення у спорудах закритого ґрунту / Т.С. Книжка, О.І. Романенко/ науковий вісник НУБіП України. - 2017. - вип. 268.-С. 11-118.

6. Сіряченко М.С. Застосування світлодіодного випромінювання для освітлення рослин закритого ґрунту. // Матеріали X міжнародного форуму молоді «Молодь і сільськогосподарська техніка в XXI ст.» Харків. – 2021. – С. 117.

7. Х. Сімітніков, В. Каназирска, К. Миниев, П. Джуров: Пер. с болгар. Тепличное овощеводство на малобъемной гидропонике – М.: Агропромиздат, 1985.

8. Алиев Э.А. Выращивание овощей в гидропонных теплицах без почвы. – К.: урожай, 1971.

9. Шишко Г.Т. Теплиці та тепличні господарства. Довідник. – К.: «Урожай», 1993.

10. Автоматизация и электрификация защищенного грунта. Под ред. Л. Г. Прищепа – М.: Колос, 1976.

11. Довідник сільського електрика / В. С. Олійник, В. М. Гайдук, В. Ф. Гончар та ін.; за ред. В. С. Олійника. - 3-тє вид., перероб. і допов. - К.: Урожай, 1989.-264 с.

12. Леман В. М. Курс светокультуры растений.- М. «Высшая школа», 1976.

13. Справочная книга по светотехнике. Под ред. Ю. Б. Айзенберга. М.: Энергоатомиздат, 1995, 520 с.

14. Казанцев Ф., Басов А. Досвечивание рассады в теплицах. Челябинск, 1959.

15. Бороздин И.Ф., Недилько Н.М. Автоматизация технологических процессов. М.: Агропромиздат, 1986.

16. Мошков Б. С. Выращивание растений при искусственном освещении. Л.-М., 1966.

17. Гордий М.В., Васянович В.Д., Одобецька А.О. Вирощування овочів у міжгосподарському теплично-овочевому комбінаті. – К.: Урожай, 1990.

18. Брызганов В.А., Советкина В.Е., Савинов Н.И. Овощеводство защищенного грунта. – М.: Колос, 1983.

19. Никифорова Л.С. Энергозбереження при електроопроміненні овочевих культур у спорудах захищеного ґрунту. Сб. науч. тр. Науковий вісник національного аграрного університету. – Київ, 1998. – № 10. – С. 33-41.

20. Дополнительное освещение в защищенном грунте. Сб. статей под ред. Г. Д. Губарь, Рига, 1974.

21. В.И. Судаченко, В.А. Терпигорев, Г.Ф. Попов, О.О. Лебл. Механизация и автоматизация работ в защищенном грунте. – Л.: Колос, Ленинградское отделение, 1982.

22. Іноземцев Г. Б., Козирський В.В. Основи наукових досліджень електрифікованих технологій в аграрному виробництві. – ЦТІ “Енергетика і електрифікація”, 2003.

23. Диордиев В.Т., Никифорова Л. Е. Влияние резонансно-периодического режима облучения на рассаду огурцов в защищенном грунте // Сб. науч. тр.: Техника в сельскохозяйственном производстве. Мелитополь, ТГАТА, 1997. – Вып. 1., Т. 3. – С. 3-5.

24. Никифорова Л.С. Результаты экспериментальных исследований эффективности режимов резонансно-периодического опроминения рассады огурцов. // Сб. науч. тр: Труды Таврической государственной агротехнической академии. Мелитополь – 1998. – Вып. 1, Т. 7. С. 90-93

25. Никифорова Л.Є. Обґрунтування енергозберігаючих режимів електричного опромінення рослин опірка в умовах захищеного ґрунту

//Сб.науч.тр.Труды Таврической государственной агротехнической академии - Вып. 1. Т. 8. – Мелитополь: ТГАТА, 1998. - С. 41-46

26. Вергунов Виктор Анатольевич, Вергунова Ирина Николаевна, Шкрабак

Владимир Степанович. Основы математического моделирования: Для анализа и прогноза агрономич. процессов / Санкт-Петербургский гос.

аграрный ун-т. — СПб. : СПбГАУ, 2003. — 219с.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України