

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Факультет захисту рослин, біотехнології та екології

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

Завідувач кафедри

фізіології, біохімії рослин та

біоенергетики

_____ Світлана ПРИЛУЦЬКА

«____» _____ 2025 р.

БАКАЛАВРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «Вплив фулерену C_{60} на вміст фотосинтетичних пігментів гарбуза
звичайного (*Cucurbita pepo*) за умов водного дефіциту»

Спеціальність: 162 «Біотехнології та біоінженерія»

Гарант освітньої програми

Кандидат біологічних наук,
доцент кафедри екобіотехнології
та біорізноманіття

_____ Олена КВАСКО
(підпис)

**Керівник бакалаврської кваліфікаційної
роботи**

Доктор біологічних наук,
професор кафедри фізіології,
біохімії рослин та біоенергетики

_____ Світлана ПРИЛУЦЬКА
(підпис)

Виконала

_____ Анна ПОГРІБНА
(підпис)

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

**Факультет захисту рослин, біотехнології та екології
Кафедра фізіології, біохімії рослин та біоенергетики
Освітній ступінь «Бакалавр»
Спеціальність 162 «Біотехнології та біоінженерія»**

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри фізіології, біохімії рослин
та біоенергетики
_____ Світлана ПРИЛУЦЬКА

“ ____ ” _____ 2025р.

З А В Д А Н Н Я

**на виконання бакалаврської кваліфікаційної роботи студенту
Погрібній Анні Сергіївні**

1. Тема роботи «Вплив фулерену C_{60} на вміст фотосинтетичних пігментів гарбуза звичайного (*Cucurbita pepo*) за умов водного дефіциту»
керівник роботи д.б.н., проф., Прилуцька Світлана Володимирівна
2. Строк подання студентом роботи 20 травня 2025 р.
3. Вихідні дані до роботи: літературні та інтернет джерела, інформація про характеристику сортів гарбуза «Український багатоплідний» та «Волзький сірий», загальноприйняті методи дослідження
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):
 - 4.1. Проаналізувати літературні джерела щодо впливу вуглецевих наноматеріалів на фізіологічні процеси в сільськогосподарських культурах.
 - 4.2. Проаналізувати літературні дані щодо впливу водного дефіциту на ріст і розвиток сільськогосподарських рослин.
 - 4.3. Оцінити концентраційно залежний вплив фулерену C_{60} на морфологічні, фізіологічні і біохімічні процеси у проростках гарбуза сортів «Український багатоплідний» та «Волзький сірий».
 - 4.4. Оцінити вплив посухи на морфологічні, фізіологічні і біохімічні процеси у проростках гарбуза сортів «Український багатоплідний» та «Волзький сірий».
 - 4.5. Оцінити дію фулерену C_{60} морфологічні, фізіологічні і біохімічні процеси у проростків гарбуза сортів «Український багатоплідний» та «Волзький сірий» за умов водного дефіциту.
5. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	Прилуцька С.В., завідувач кафедри		

	фізіології, біохімії рослин та біоенергетики		
2	Прилуцька С.В., завідувач кафедри фізіології, біохімії рослин та біоенергетики		
3	Прилуцька С.В., завідувач кафедри фізіології, біохімії рослин та біоенергетики		

6. Дата видачі завдання 20 серпня 2024 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Приміт ка
1	Аналіз літературних джерел щодо впливу фулерену C ₆₀ та посухи на фізіологічні і біохімічні процеси сільськогосподарських культур	Серпень- жовтень	
2	Оцінити вплив фулерену C ₆₀ на морфологічні, фізіологічні і біохімічні показники у проростках гарбуза сортів «Український багатоплідний» та «Волзький сірий». Аналіз отриманих результатів дослідження	Листопад- грудень	
3	Оцінити вплив посухи на фізіологічні і біохімічні процеси у проростках гарбуза сортів «Український багатоплідний» та «Волзький сірий». Аналіз отриманих результатів дослідження	Січень- лютий	
4	Оцінити дію фулерену C ₆₀ на морфологічні, фізіологічні і біохімічні показники проростків гарбуза сортів «Український багатоплідний» та «Волзький сірий» за умов водного дефіциту. Аналіз отриманих результатів дослідження	Березень- квітень	
5	Оформлення дипломної роботи згідно вимог та підготовка до захисту	Травень	

Керівник кваліфікаційної роботи

Світлана ПРИЛУЦЬКА

Завдання прийняла до виконання

Анна ПОГРІБНА

РЕФЕРАТ

Бакалаврська кваліфікаційна робота на тему «Вплив фулерену C_{60} на вміст фотосинтетичних пігментів гарбуза звичайного (*Cucurbita pepo*) за умов водного дефіциту» налічує 55 сторінок формату А4. У ній наведено 6 таблиць, 18 рисунків та використано 32 літературних джерела (мало!).

Робота структурована у вигляді вступу, трьох основних розділів – огляд літератури, матеріали та методи, результати досліджень, а також містить висновки та список використаних джерел.

Актуальність роботи обумовлена негативним впливом водного дефіциту на сільськогосподарські культури, зокрема, гарбуз звичайний (*Cucurbita pepo*), який є важливою харчовою та промисловою рослиною. Водний стрес суттєво порушує фотосинтетичні процеси, що призводить до зниження росту, розвитку та врожайності рослин. У зв'язку з цим зростає потреба у пошуку ефективних методів і засобів підвищення стійкості рослин до посухи. Фулерен C_{60} – перспективний наноматеріал з потужними антиоксидантними властивостями, який здатний знижувати окисний стрес та підтримувати функціонування фотосинтетичних пігментів. Дослідження впливу фулерену C_{60} на вміст фотосинтетичних пігментів гарбуза за умов водного дефіциту має велике значення для розвитку біотехнологічних методів підвищення адаптивності культур до стресових умов і забезпечення стабільного виробництва [1].

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Вивчити морфометричні показники рослин гарбуза за умов нормального поливу, водного дефіциту та фулерену
2. Оцінити вміст фотосинтетичних пігментів – хлорофілу а, хлорофілу b та каротиноїдів за умов нормального поливу, водного дефіциту та фулерену у гарбуза

3. Оцінити активність каталази за умов нормального поливу, водного дефіциту та фулерену у гарбуза
4. Виявити оптимальні концентрації фулерену C₆₀ для підвищення стійкості гарбуза до водного стресу.

Метою дослідження було проаналізувати вплив фулерену C₆₀ у діапазоні концентрацій (0,1 мкг/мл, 0,2 мкг/мл, 0,5 мкг/мл і 1 мкг/мл) на функціонування фотосинтетичного апарату у листках гарбуза звичайного (*Cucurbita pepo*) за умов водного дефіциту з метою оцінки його здатності підвищувати стійкість рослин до абіотичних стресів і покращувати фотосинтетичну активність.

Об'єктом дослідження є особливості морфометричних, фізіологічних та біохімічних змін у рослинах гарбуза звичайного (*Cucurbita pepo*) під впливом фулерену C₆₀ за умов водного дефіциту, які відображають адаптаційні реакції рослин на стресові фактори навколишнього середовища.

Предметом дослідження є рослини двох сортів гарбуза звичайного (*Cucurbita pepo*) – «Український багатоплідний» та «Волзький сірий», водні колоїдні розчини структурованого фулерену C₆₀.

Методологія дослідження морфометричні показники (довжина пагону, довжина кореня, кількість листків, діаметр пагону, маса рослин), спектрофотометричний метод визначення вмісту фотосинтетичних пігментів та активності каталази, статистична обробка отриманих даних.

Практична значущість отриманих результатів полягає у можливості використання наноструктурованого фулерену C₆₀ для підвищення стійкості гарбуза звичайного (*Cucurbita pepo*) до водного дефіциту, що може бути впроваджено у біотехнологічні процеси рослинництва.

ЗМІСТ

Вступ	8
Розділ 1. Огляд літератури	9
1.1. Гарбуз звичайний (<i>Cucurbita pepo</i>) як сільськогосподарська культура.	9
1.2. Фотосинтетична система рослин і її реакція на стресові фактори	13
1.3. Фулерени C_{60} у рослинництві: потенційний вплив на ріст, розвиток та фотосинтез.....	18
Розділ 2. Матеріали і методи	22
2.1. Об'єкт дослідження умови проведення експерименту	22
2.2. Визначення морфометричних параметрів рослин.....	25
2.3. Визначення вмісту фотосинтетичних пігментів.	26
2.4. Визначення активності каталази.	29
2.5. Статистична обробка даних	30
Розділ 3. Результати та їх аналіз	32
3.1. Вплив фулерену C_{60} на морфометричні показники гарбуза за умов водного дефіциту.....	32
3.2. Вплив фулерену C_{60} на вміст фотосинтетичних пігментів у гарбуза за умов водного дефіциту	40
3.3. Вплив фулерену C_{60} на активність каталази у гарбуза за умов водного дефіциту.....	46
Висновки	50
Список використаних джерел	52

ВСТУП

Водний дефіцит є однією з найпоширеніших і найнебезпечніших абіотичних стресових умов, що негативно впливають на ріст, розвиток і продуктивність сільськогосподарських культур. У зв'язку з глобальними змінами клімату проблема посухи стає дедалі актуальнішою, що викликає потребу у пошуку нових способів підвищення стійкості рослин до нестачі вологи. Гарбуз звичайний (*Cucurbita pepo*) – важлива харчова і промислова культура, яка особливо чутлива до водного стресу. Водний дефіцит порушує фотосинтетичні процеси, зокрема знижує вміст фотосинтетичних пігментів, що негативно впливає на ефективність фотосинтезу та загальну життєздатність рослин [2,3].

Сучасні біотехнологічні дослідження орієнтовані на застосування наноматеріалів як засобів покращення адаптивних реакцій рослин до стресових факторів. Одним із перспективних наноматеріалів є фулерен C_{60} – молекула з унікальними антиоксидантними властивостями, здатна зменшувати рівень окисного стресу і підтримувати функціонування фотосинтетичного апарату. Однак механізми впливу фулерену на фотосинтетичні процеси у рослин за умов водного дефіциту досі недостатньо вивчені [4].

У цій роботі досліджується вплив фулерену C_{60} на морфометричні показники, вміст фотосинтетичних пігментів та активність каталази у листках гарбуза звичайного (*Cucurbita pepo*) за умов водного дефіциту. Для цього було використано морфометричні, спектрофотометричні та статистичні методи, що дозволяють оцінити зміни фотосинтетичного апарату рослин під впливом наноматеріалу.

Наукова новизна дослідження полягає у комплексному вивченні впливу наноструктурованого фулерену C_{60} на фотосинтетичні пігменти рослин гарбуза в умовах водного стресу, що відкриває перспективи для розробки нових біотехнологічних підходів до підвищення стійкості культур.

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

1.1. Гарбуз звичайний (*Cucurbita pepo*) як сільськогосподарська культура.

Гарбуз звичайний (*Cucurbita pepo*) є однією з найбільш поширених сільськогосподарських культур родини гарбузових (*Cucurbitaceae*), що вирощується для харчових, кормових та технічних цілей. Ця однорічна рослина має чітко виражені морфологічні ознаки, що можуть змінюватися в залежності від сорту та умов вирощування. Основні органи гарбуза – корінь, стебло, листя, квіти та плоди – виконують важливі функції в його життєвому циклі [5].

Коренева система гарбуза розвинена поверхнево, з головним стрижневим коренем і численними бічними корінцями. Завдяки такій структурі вона забезпечує ефективне пристосування до різноманітних ґрунтових умов, але для досягнення оптимальних показників росту бажано використовувати родючі ґрунти.

Стебло гарбуза є товстим, розгалуженим та має міцну структуру, що дозволяє рослині підтримувати важкі плоди. Воно покрите тонкими ворсинками, які захищають рослину від деяких шкідників та зменшує випаровування вологи.

Листя гарбуза великі, широкі, серцеподібної форми з глибокими зубцями. Їхня щільна поверхня сприяє зменшенню втрат води за високих температур. Листя гарбуза відіграє роль у фотосинтетичному процесі, використовуючи енергію сонця для забезпечення рослини ресурсами, необхідними для її росту та розвитку.

Квітки гарбуза одностатеві, причому на одній рослині розташовані як чоловічі, так і жіночі квітки, що мають виражений диморфізм. Чоловічі квітки мають довгі стебла і розташовуються на основних пагонах, тоді як жіночі квітки, що утворюють плоди, зазвичай з'являються на бічних пагонах.

Перехресне запилення є необхідним для гарбуза, тому що самозапилення квіток відбувається дуже рідко.

Плоди гарбуза звичайного мають різноманітну форму, колір і розмір, що залежить від сорту. Плоди можуть бути округлими, овальними, або видовженими. Їхня шкірка може бути гладкою або покритою борозенками та горбиками. Колір шкірки варіюється від світло-зеленого до жовтого, оранжевого, червоного та навіть білого, що також визначається генетичними особливостями конкретного сорту. М'якуш плодів, як правило, має яскраво-оранжевий або білий колір, який залежить від вмісту каротиноїдів, зокрема бета-каротину. Вміст води в м'якуші може бути різним залежно від умов вирощування, але зазвичай він становить близько 90% [6].

Гарбуз має високу біологічну різноманітність сортів, що дозволяє йому займати провідні позиції серед сільськогосподарських культур. Існують такі типи сортів гарбуза: кормові, столові, технічні та декоративні. Столові сорти, зокрема, включають гарбузи для вирощування на продовольчі цілі, які мають відмінні органолептичні властивості, великий вміст вітамінів та мінералів. Кормові сорти вирощуються для тваринництва і зазвичай мають більший розмір плодів, але з меншою харчовою цінністю, ніж у столових гарбузів. Технічні сорти вирощуються для отримання насіння, яке використовується в косметичних, медичних, біоенергетичних галузях. Декоративні сорти гарбуза вирощуються для озеленення садів, клумб та для використання в осінніх святкових декораціях, таких як Хелловін. Вони характеризуються яскравими кольорами, нестандартними формами та різними розмірами. Ці гарбузи застосовуються для створення осінніх композицій, вінків і декорування святкових страв [7].

Морфологічні особливості гарбуза звичайного безпосередньо впливають на його адаптацію до різних умов вирощування. Кожен орган рослини від кореневої системи до плодів має специфічні вимоги до навколишнього середовища, саме тому слід враховувати агрокультурні умови, які забезпечать високу продуктивність.

Гарбуз є теплолюбною рослиною, що потребує помірного тепла для нормального розвитку. Оптимальні умови для росту цієї культури забезпечуються при температурі у межах 22–28 °С. Високі температури можуть спричинити перегрів рослини, що веде до уповільнення росту і розвитку, особливо в період формування плодів. Низькі температури можуть негативно впливати на фотосинтетичну активність та ріст рослин, що призводить до зниження їх продуктивності. З цієї причини гарбуз найкраще вирощувати в регіонах з помірним або теплим кліматом, де мінімальна температура не опускається нижче 10 °С [8].

Вологість ґрунту є визначальним фактором для гарбуза, оскільки рослина чутлива до водного дефіциту, особливо під час інтенсивного росту та формування плодів. Для нормального розвитку гарбуз потребує рівномірного зволоження ґрунту. Водночас, надмірна волога може спричинити розвиток грибкових хвороб та загнивання коренів, тому необхідно забезпечити належне зрошення в посушливі періоди.

Тип ґрунту має вагомий вплив на процес вирощування гарбуза. Найбільш придатними вважаються легкі, добре дреновані ґрунти з нейтральною або слабо кислою реакцією (рН 6–7). Гарбуз краще розвивається на родючих ґрунтах, багатих на органічні речовини, які забезпечують рослину необхідними елементами живлення для активного росту. Піщані та супіщані ґрунти є оптимальними для цієї культури, за умови, що вони збагачені гумусом і мають належне співвідношення води та повітря в порах, що дозволяє одночасно утримувати вологу та забезпечувати кореневу систему достатньою кількістю кисню. Якщо ж ґрунт важкий або погано дренований, можливе застоювання води, що спричиняє загнивання коренів і зниження врожайності.

Агротехнічні заходи необхідні у процесі вирощування гарбуза звичайного (*Cucurbita pepo*), адже впливають на врожайність та адаптацію рослини до стресових чинників. Глибокий обробіток ґрунту покращує його аерацію, водопроникність і доступність поживних речовин для кореневої системи. Застосування сівозміни з культурами, не спорідненими з гарбузовими, знижує

ризик накопичення збудників хвороб і шкідників, сприяючи фітосанітарному оздоровленню ґрунту. Органічні добрива підвищують вміст гумусу, покращують структуру ґрунту та збагачують його необхідними елементами живлення. Комплексне застосування цих заходів створює оптимальні умови для росту культури та забезпечує стабільно високі показники врожайності [9, 10].

На підставі досліджень науковців, оптимальні умови для вирощування гарбуза в Україні включають такі характеристики (табл. 1.1.).

Таблиця 1.1. Оптимальні агрокліматичні умови для вирощування гарбуза звичайного (*Cucurbita pepo*) в Україні.

Параметр	Оптимальні значення/ Рекомендації
Температура повітря	Оптимальна: 25–30 °С; мінімальна для проростання: 5–12 °С; критична: нижче 0 °С
Температура ґрунту	Для сівби: не нижче 12–14 °С на глибині 10 см
Вологість ґрунту	Оптимальна вологість ґрунту становить 65–80% найменшої вологоємності, при цьому у період формування плодів вона повинна підтримуватись на рівні 70–75%, а на етапі досягання – 65–70%.
Вологість повітря	45–60%
Тип ґрунту	Легкі, добре дреновані, з нейтральною або слабо кислою реакцією (рН 6–7)
Глибина сівби насіння	5–6 см; за достатньої вологості – до 8–10 см
Площа живлення рослин	На неполивних землях: не менше 2 м ² ; на зрошуваних – 1–2 м ²
Схема сівби	140 × 140 см, 180 × 110 см, 210 × 100 см або 280 × 70 см
Добрива	Органічні: 20–40 т/га гною; мінеральні: N _{45–60} P ₆₀ K _{45–60}
Сівозміна	Кращі попередники: озима пшениця, зернобобові, кукурудза на силос; небажані: інші гарбузові культури
Обробіток ґрунту	Глибока оранка на 23–27 см; передпосівна культивування на 10–12 см
Підготовка насіння	Прогрівання при 18–25 °С протягом 2–3 днів; обробка мікроелементами та протруювання

Економічна доцільність вирощування гарбуза звичайного (*Cucurbita pepo*) пояснюється його високою врожайністю, невибагливістю до умов вирощування та широким спектром використання продукції. Культура добре адаптується до

різних кліматичних зон, потребує помірних витрат на агротехніку та забезпечує стабільний дохід завдяки попиту на плоди й насіння. Гарбуз також відзначається здатністю до тривалого зберігання без втрати якості, що сприяє його реалізації не лише в сезон збору, а й у міжсезоння. Це робить його вирощування економічно вигідним для різних форм агровиробництва [11].

Підсумовуючи, гарбуз звичайний (*Cucurbita pepo*) є цінною сільськогосподарською культурою завдяки високій адаптивності до різних умов вирощування, поживній цінності плодів та широкому спектру використання (харчова, кормова, фармацевтична, косметична галузі). Поєднання врожайності, невибагливості та економічної доцільності вирощування визначає його важливе місце в системі сучасного рослинництва.

1.2. Фотосинтетична система рослин і її реакція на стресові фактори.

Фотосинтетичний апарат рослин є складною структурно-функціональною системою, яка забезпечує процес перетворення світлової енергії в хімічну. Основним місцем фотосинтезу є хлоропласти – органели, які входять до складу клітин мезофілу листка. Вони мають двомембранну оболонку та внутрішню систему мембран, що утворює тилакоїди. У тилакоїдних мембранах локалізовані основні елементи фотосинтетичного електротранспортного ланцюга – фотосистеми I та II, а також ферментативні комплекси, які забезпечують фотофосфорилування і утворення АТФ [12].

Фотосинтетичний процес складається з двох основних фаз – світлової та темної. Під час світлової фази світло поглинається фотосистемами, що спричиняє збудження електронів і утворення енергетичних молекул АТФ та НАДФ·Н. Одночасно відбувається фотоліз води з вивільнення кисню. Темнова фаза фотосинтезу відбувається на стромі хлоропластів, де відновлений НАДФ·Н та АТФ, утворені в світловій фазі, використовуються для фіксації вуглекислого газу в циклі Кальвіна. У цьому процесі CO_2 приєднується до рибулозо-1,5-бісфосфату з утворенням 3-фосфогліцеринової кислоти, яка в подальших реакціях перетворюється на глюкозу та інші органічні сполуки [13].

Фотосинтетичні пігменти відіграють важливу роль у забезпеченні ефективного поглинання світлової енергії, яка є рушійною силою для перебігу фотосинтезу. Вони входять до складу антенних комплексів фотосистем, де здійснюється первинне захоплення фотонів і перенаправлення енергії до реакційних центрів. Завдяки їхній здатності поглинати світло в різних ділянках спектра, рослини можуть максимально ефективно використовувати сонячне випромінювання в умовах змінної освітленості [14].

Основне навантаження у фотохімічному перетворенні енергії покладається на хлорофіл а, який бере участь у перетворенні енергії світла в енергію електронів під час збудження фотосистем. Його присутність у реакційних центрах фотосистем I і II є необхідною умовою для запуску ланцюга переносу електронів. Хлорофіл b не бере прямої участі у збудженні електронів, проте сприяє розширенню спектра світла, яке поглинається антенними комплексами, тим самим посилюючи їх фоточутливість і підвищуючи ефективність фотосинтезу за умов недостатнього освітлення [15].

Каротиноїди відіграють важливу роль у фотосинтетичному апараті, поєднуючи функції світлопоглинання та захисту. Вони запобігають ушкодженню фотосистем активними формами кисню, які утворюються внаслідок надмірного освітлення. Завдяки своїм антиоксидантним властивостям каротиноїди забезпечують стабільність фотохімічних процесів навіть за дії стресових факторів. У таблиці 1.2. наведено типові діапазони спектрального поглинання основних фотосинтетичних пігментів, а також коротку характеристику їхньої ролі у фотосинтезі.

Фотосинтетична система рослин є чутливим індикатором впливу стресових чинників навколишнього середовища. Будь-яке відхилення від оптимальних умов росту, таких як забезпеченість вологою, освітленість, температурний режим чи мінеральне живлення, призводить до значних змін у функціонуванні фотосинтетичного апарату [16].

Одним із найбільш поширених та досліджуваних видів абіотичного стресу є водний дефіцит, що суттєво впливає на фізіологію рослин. За умов

нестачі вологи в ґрунті, рослина переживає зниження тургору тканин, що призводить до часткового або повного закриття продихів листків. Цей захисний механізм дозволяє зменшити випаровування води. Як наслідок, обмежується надходження вуглекислого газу до хлоропластів, що призводить до зниження ефективності циклу Кальвіна, уповільнення синтезу органічних речовин.

Таблиця 1.2. Основні фотосинтетичні пігменти: спектральні характеристики, функції та локалізація в хлоропласті.

Пігмент	Спектральна ділянка з довжинами хвиль	Колір пігменту	Функція	Локалізація в хлоропласті
Хлорофіл а	Синя (430-450 нм) та червона (640-680 нм)	Синьо-зелений	Основний пігмент, що забезпечує перетворення світла в хімічну енергію	Реакційні центри фотосистем I та II
Хлорофіл b	Синьо-фіолетова (450–470 нм) та червона (620–650 нм)	Жовтувато-зелений	Допоміжний пігмент, передає енергію хлорофілу а, розширює спектр поглинання	Антенні комплекси фотосистем
Каротиноїди	Фіолетова та синя (400–500 нм)	Жовто-оранжевий	Захист фотосистем від надлишку світла, поглинання синьо-фіолетового світла	Антенні комплекси, тилакоїдні мембрани

Температурний стрес значною мірою впливає на перебіг фотосинтетичних реакцій. При підвищенні температури до критичних значень відбувається термічна денатурація білків фотосистем, порушується цілісність мембранних структур хлоропластів і зменшується активність основних

ферментів фотосинтезу, зокрема Рубіско. Натомість низькі температури уповільнюють перебіг ферментативних реакцій та пригнічують загальний метаболізм у клітинах. В обох випадках порушується стабільність функціонування фотосинтетичного апарату, що негативно позначається на ріст і розвиток рослини загалом.

Освітленість також впливає на інтенсивність фотосинтезу. Надмірне світло спричиняє світловий стрес, за якого фотосистеми поглинають більше енергії, ніж можуть ефективно використати, що призводить до утворення активних форм кисню. Вони ушкоджують мембрани, пігменти та білки фотосинтетичних комплексів, викликаючи фотоінгібування. Для захисту рослина активує антиоксидантні механізми, зокрема за участю каротиноїдів, однак при тривалій дії надлишкового освітлення ці системи можуть бути недостатньо ефективними [17].

Нестача таких мінеральних елементів, як азот, магній і залізо, негативно впливає на функціонування фотосинтетичного апарату, оскільки вони є ключовими компонентами у біосинтезі пігментів. Їхній дефіцит призводить до зниження рівня хлорофілів і зменшення здатності листків ефективно поглинати світло. У результаті знижується фотосинтетична активність, що супроводжується пригніченням ростових процесів і зменшенням стійкості рослин до дії стресових чинників. Тому дослідження впливу різних стресових чинників на фотосинтез є важливим як для розуміння механізмів адаптації рослин, так і для розробки шляхів підвищення їх стійкості та продуктивності в умовах мінливого клімату.

У ході еволюційного розвитку рослини сформували комплекс ефективних адаптаційних механізмів, які забезпечують збереження стабільності фотосинтетичних процесів під впливом стресових чинників.

Одним із важливих напрямів адаптації рослин до дії стресових факторів є зміна пігментного складу фотосинтетичного апарату. Зокрема, за умов тривалого світлового або температурного стресу, а також при водному дефіциті, рослини можуть регулювати співвідношення хлорофілів і каротиноїдів. Як

правило, вміст каротиноїдів зростає відносно кількості хлорофілів, що дозволяє посилити захист рослинних клітин від фотодеструктивних впливів та зменшити ушкодження фотосистем активними формами кисню. Крім цього, за умов стресу відбувається активація антиоксидантної системи, включаючи підвищення активності ферментів, таких як супероксиддисмутаза, каталаза, пероксидаза, що забезпечують нейтралізацію реактивних кисневих сполук та збереження стабільності мембран і білків фотосинтетичних комплексів [18].

Важливим адаптаційним механізмом є також регуляція роботи продихів листків, які відповідають за газообмін і транспірацію рослин. За умов водного дефіциту чи високих температур продихи можуть закриватися, що зменшує втрати води рослиною, але одночасно знижує доступність вуглекислого газу. Для компенсації цього рослини можуть активізувати альтернативні метаболічні шляхи, зокрема переходити до САМ-фотосинтезу чи С4-фотосинтезу, що дозволяє ефективніше використовувати доступні ресурси.

У відповідь на температурний стрес рослини здійснюють перебудову ліпідного складу мембран фотосинтетичного апарату. За умов підвищених температур, збільшується частка насичених жирних кислот у складі мембранних ліпідів, що забезпечує стійкість і функціональну цілісність мембранних структур. За знижених температур підвищується частка ненасичених жирних кислот, що зберігає пластичність мембран [19].

Таким чином, адаптаційні реакції фотосинтетичного апарату до дії стресових чинників є складними і багаторівневими. Вони включають як швидкі фізіологічні відповіді, так і глибокі перебудови на молекулярному рівні. Завдяки цим механізмам, рослини здатні зберігати фотосинтетичну активність, підтримувати ріст і розвиток навіть за несприятливих умов середовища, що має важливе значення для їх виживання та продуктивності.

1.3. Фулерени C_{60} у рослинництві: потенційний вплив на ріст, розвиток та фотосинтез.

Фулерен C_{60} є унікальною формою вуглецю, що належить до класу наноматеріалів, відкритих у 1985 році. Його молекула складається з 60 атомів вуглецю, розташованих у формі симетричного сферичного каркаса, який нагадує футбольний м'яч (рис.1.1.). Така геометрія забезпечує високу стабільність молекули та здатність до взаємодії з різними біомолекулами.

Завдяки своїй порожнистій структурі й насиченості π -зв'язками фулерен C_{60} має виражену електронну активність, що надає йому потенційно важливі властивості в біологічних і технологічних застосуваннях. У рослинництві фулерен C_{60} розглядається як перспективний агент завдяки його високій антиоксидантній здатності [20].

Він здатен ефективно нейтралізувати активні форми кисню (АФК), які накопичуються у клітинах під впливом стресових факторів, таких як надмірне освітлення, високі або низькі температури, дефіцит води чи забруднення довкілля. Завдяки цьому фулерен може діяти як стабілізатор клітинного середовища, тим самим зменшуючи окисний стрес рослини.

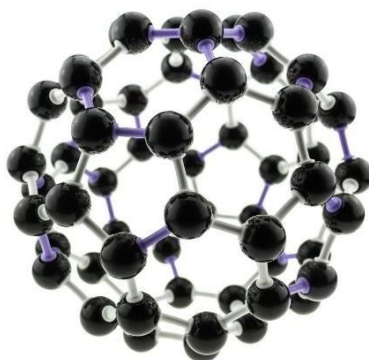


Рисунок 1.1. Модель будови фулерену C_{60} . Джерело: [<https://odo.com.ua>].

Завдяки своїм нанорозмірам, фулерен C_{60} має здатність проходити через клітинні мембрани та переміщатися всередині клітини, включаючи хлоропласти, що дає йому можливість безпосередньо впливати на фотосинтетичні процеси. Фулерен C_{60} може взаємодіяти з фосфоліпідами мембран хлоропластів та білками, що беруть участь у фотосинтетичному процесі, знижуючи їх окиснення і підвищуючи ефективність енергетичних

процесів. Такий механізм дії набуває важливого значення за умов стресу, коли порушується структура та функціонування апарату [21].

Крім того, ця молекула є хімічно інертною, що знижує ризик утворення токсичних сполук при її взаємодії з клітинними структурами. Ще однією важливою властивістю фулерена C_{60} є його здатність до хімічної модифікації, тобто приєднання функціональних груп, що відкриває можливість створення похідних сполук із кращою біосумісністю та ширшими біологічними властивостями.

Біологічна активність фулерена C_{60} у рослинних системах викликає значний науковий інтерес, оскільки ця молекула здатна впливати на широкий спектр фізіологічних та біохімічних процесів. Зокрема, численні дослідження демонструють, що фулерен C_{60} може проявляти як стимулюючу дію, так і пригнічуючу дію на ріст і розвиток рослин залежно від концентрації, способу введення та виду культури. У низьких концентраціях фулерен може підвищувати життєздатність проростків, стимулювати поділ клітин у зонах активного росту, а також сприяти формуванню більш розгалуженої кореневої системи [22].

Одним із важливих механізмів біологічної дії фулерена C_{60} є його здатність до зв'язування та нейтралізації активних форм кисню (АФК), що дозволяє зменшити рівень пероксидного окиснення ліпідів та запобігти пошкодженню клітинних мембран. Антиоксидантна активність має особливе значення за умов дії стресових факторів, коли в рослин спостерігається надмірне утворення АФК. Фулерен також сприяє активації антиоксидантних ферментів, що допомагає підвищити адаптивний потенціал рослин, сприяючи кращій стійкості до стресів. Зменшення рівня окисного стресу сприяє підтриманню цілісності клітинних структур і нормалізації метаболізму, що загалом покращує фізіологічний стан рослини.

Дослідження також показали, що фулерен C_{60} здатний впливати на регуляцію експресії генів, залучених до антистресових відповідей та гормонального контролю ростових процесів. Його дія в клітинному середовищі

може змінювати активність антиоксидантних ферментів, що сприяє підвищенню адаптивного потенціалу рослин до стресових умов. Крім того, відзначено зростання концентрації вторинних метаболітів, таких як фенольні сполуки, які виконують важливу роль у захисних механізмах клітини [23,24].

Одним із перших проявів дії фулерена C_{60} є його вплив на пігментний склад. Було зафіксовано підвищення вмісту хлорофілу а і b, а також каротиноїдів у листках, що свідчить про покращення стану фотосинтетичних структур. Ці зміни, як правило, супроводжуються зростанням співвідношення хлорофілів до каротиноїдів, що може вказувати на зниження окисного стресу та збереження цілісності тилакоїдних мембран.

Також відзначено позитивний вплив фулерена C_{60} на активність фотосистем I та II. У дослідженнях, де використовували спектрометричні методи та аналіз флуоресценції хлорофілу, спостерігалось поліпшення параметрів квантової ефективності фотосистеми II та збільшення фотохімічної продуктивності. Це свідчить про оптимізацію енергетичних процесів у межах тилакоїдної мембрани та кращу реалізацію поглиненої світлової енергії в електронотранспортному ланцюзі. Зниження окислення білків і пігментів дозволяє зберігати ефективність фотосистем за стресових умов. Ймовірно, такий ефект пов'язаний із тим, що фулерен C_{60} , виконуючи роль антиоксиданту, знижує ушкодження білково-пігментних комплексів, які є вразливими до дії АФК [25].

У деяких дослідженнях повідомлялося про підвищення інтенсивності фотосинтезу та покращення асиміляції CO_2 у рослин, оброблених фулереном C_{60} . Це може бути наслідком загального покращення стану листкової тканини, а також збереження продигової активності за умов стресу. Це забезпечує ефективніший обмін газів і транспортування фотосинтетичних продуктів. Водночас у науковій літературі зазначено, що ефект фулерена C_{60} значною мірою залежить від його концентрації: у надмірних кількостях наноматеріал може викликати порушення мембранної проникності та пригнічення фотосинтетичних процесів [26].

Загалом, фулерен C_{60} має значний потенціал у рослинництві завдяки своїй здатності знижувати окисний стрес, покращувати фотосинтетичні процеси та стимулювати ріст і розвиток рослин. Однак, як і у випадку з іншими наноматеріалами, його ефективність та безпека можуть значною мірою залежати від концентрації та умов застосування.

РОЗДІЛ 2. МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

2.1. Об'єкт дослідження умови проведення експерименту.

Об'єктом дослідження є гарбуз звичайний (*Cucurbita pepo*) двох сортів: Український багатоплідний та Волзький сірий. Вибір саме цих сортів обумовлений їхньою агрономічною цінністю, а також різними фізіологічними характеристиками, які дозволяють детально вивчити реакцію рослин на різні агрономічні фактори, зокрема водний дефіцит.

Український багатоплідний гарбуз (рис. 2.1.) є ранньостиглим сортом, що дозріває за 85-100 днів після посіву. Плоди мають коротко-овальну форму з переходом до плодоніжки, їхня середня маса становить 5-9 кг. Поверхня плода слабо ребриста. М'якуш щільний, багатий на цукри, вітамін С, провітамін А та бета-каротин. Насіння містить до 50% олії. Використовується як у сирому вигляді, так і після кулінарної обробки [27].



Рисунок 2.1. Пакування насіння гарбуза сорту «Український багатоплідний» (зліва) та демонстрація зовнішнього вигляду насіння цього сорту (справа).

Волзький сірий гарбуз (рис. 2.2) – один із популярних сортів крупноплідного гарбуза з пізнім терміном дозрівання, період вегетації якого

становить 102-120 днів. Рослина плетиста, а плоди мають масу від 6 до 9 кг, округлу або округло-плоску форму. Шкірка плоду сірого кольору, а м'якоть яскраво жовта та відзначається відмінними смаковими властивостями. Цей сорт вирощується як для отримання насіння, так і для використання м'якоті в кулінарії, зокрема для приготування каш, пюре, дитячого харчування та соків [28].



Рисунок 2.2. Пакування насіння гарбуза сорту «Волзький сірий» (зліва) та демонстрація зовнішнього вигляду насіння цього сорту (справа).

Умови експерименту

Спочатку було оброблено насіння гарбуза, яке включало стерилізацію та активацію пророщення насіння. Для цього насіння обробляли 2% розчином NaCl упродовж 10 хвилин, після чого його промивали проточною водою. Далі насіння занурювали в 2% розчин H_3BO_3 на 25 хвилин, після чого також тричі промивали водою. Потім насіння обробляли 3% розчином H_2O_2 протягом 15 хвилин, після чого проводили ще тричі промивання водою.

Далі насіння обробляли водним колоїдним розчином наноматеріалу. У підготовлені чашки Петрі розміщували по 12 насінин гарбуза, де контрольні

зразки замочували в дистильованій воді, а дослідні – в колоїдних водних розчинах фулерену відповідних концентрацій (0,1 мкг/мл, 0,2 мкг/мл, 0,5 мкг/мл, 1 мкг/мл) і залишали на 48 годин в темному місці при температурі 18-20°C (рис.2.3.).



Рисунок 2.3. Оброблене насіння гарбуза фулереном C_{60} різних концентрацій.

Після цього насіння гарбуза переносили в відповідні контейнери з ґрунтом, рівномірно розподіляючи по поверхні (рис.2.4.).



Рисунок 2.4. Висадка насіння гарбуза в ґрунт в спеціальних контейнерах.

У випадку недостатнього зволоження (водний дефіцит) для пророщування насіння, через 3 дні здійснювалося обприскування водою за допомогою пульверизатора. Обприскування припинялося через 2 дні після проростання насіння. Полив зразків відновлювали за добу до проведення досліджень. Для

дослідних зразків, де не імітувалась посуха, обприскування проводили регулярно, з інтервалом у 1 день (рис.2.5.).

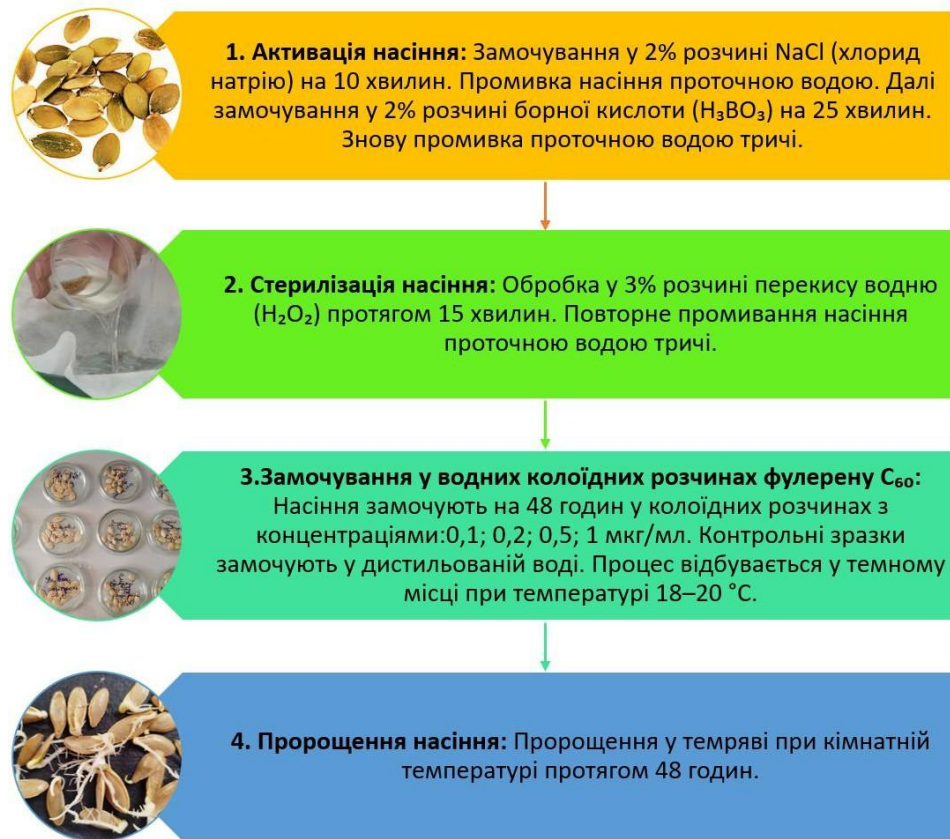


Рисунок 2.5. Схема обробки насіння гарбуза

2.2. Визначення морфометричних параметрів рослин.

У межах дослідження для оцінки впливу фулерену C_{60} на рослини гарбуза звичайного (*Cucurbita pepo*) за умов водного дефіциту визначали такі морфометричні показники: довжину пагону, довжину кореня, діаметр пагона, кількість листків та загальну масу рослини.

Для вимірювання довжини пагону, довжини кореня та діаметру пагону використовували мірну лінійку з точністю до 1 мм. Кількість листків визначали шляхом прямого підрахунку сформованих листків на кожній рослині (рис.2.6.).



Рисунок 2.6. Вимірювання морфометричних показників проростків гарбуза на 14 день пророщування.

Для визначення маси рослини зразки рослин висушували при температурі 60-70°C до постійної маси, що дозволяє уникнути впливу залишкової вологи на результат. Зважування проводилось на електронних вагах з точністю до 0,01 г. Маса рослини можна використовувати для порівняння з іншими параметрами, такими як довжина пагона чи кількість листків, що дозволяє зробити висновки про ефективність росту в залежності від обраних умов.

Усі морфометричні вимірювання проводилися тричі для кожної рослини, з подальшим розрахунком середніх значень, що дозволяє отримати більш надійні та точні результати. Зібрані дані використовуються для аналізу фізіологічних процесів у рослинах, порівняння різних варіантів обробки, а також для вивчення впливу агрономічних факторів, таких як водний дефіцит, на ріст і розвиток рослин. Такий підхід дозволяє не лише оцінити стан рослин на певному етапі їхнього розвитку, а й спрогнозувати їхню здатність до адаптації в умовах змінного середовища [29].

2.3. Визначення вмісту фотосинтетичних пігментів.

Для визначення вмісту фотосинтетичних пігментів спочатку проводили екстракцію з рослинного матеріалу. Для цього 100 мг сухого рослинного

матеріалу подрібнювали. Для екстракції рослинного матеріалу додали 5 мл 96% етилового спирту. Зразок ретельно перемішували, щоб розчинити пігменти, після чого його фільтрували через паперовий фільтр для видалення твердої рослинної тканини (рис.2.7.).

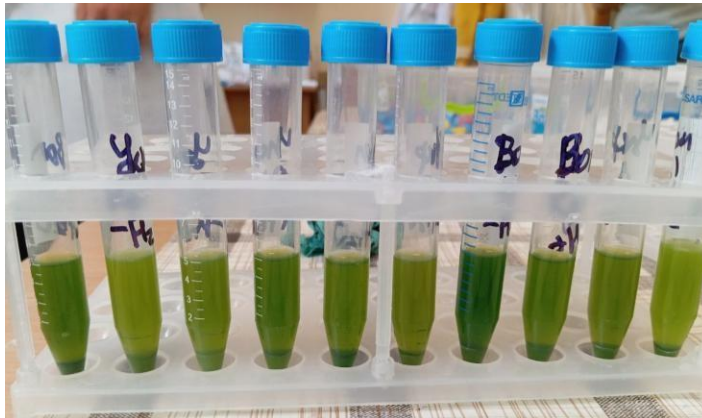


Рисунок 2.7. Спиртовий екстракт листя гарбуза для визначення вмісту пігментів.

Для визначення концентрації пігментів використовували спектрофотометр, який вимірює поглинання світла при специфічних довжинах хвиль, характерних для кожного пігменту. Хлорофіл а має максимальне поглинання на довжині хвилі 665 нм, хлорофіл b – на 649 нм, а каротиноїди – на 441 нм. Для точних вимірювань використовують стандартні калібровки для кожного пігменту, що дозволяє отримати чітке співвідношення між поглинанням і концентрацією пігменту в екстракті.

Після того, як було зроблено вимірювання спектрофотометричним методом на заданих довжинах хвиль, проводили розрахунок концентрації хлорофілу а, хлорофілу b та каротиноїдів. Формули для визначення концентрації хлорофілу а та b виглядають наступним чином:

$$C_{\text{хл.а,мг/л}} = 12,21 \cdot D_{665} - 2,81 \cdot D_{649} , \quad (2.1)$$

де $C_{\text{хл.а}}$ – концентрація хлорофілу а, мг/л; D_{665} – оптична густина при довжині 665 нм; D_{649} – оптична густина при довжині 649 нм.

$$C_{\text{хл.б,мг/л}} = 20,13 \cdot D_{649} - 5,03 \cdot D_{665} , \quad (2.2)$$

де $C_{chl.b}$ – концентрація хлорофілу b, мг/л; D_{649} – оптична густина при довжині 649 нм; D_{665} – оптична густина при довжині 665 нм;

Для визначення вмісту каротиноїдів використовується аналогічний метод. Поглинання світла для каротиноїдів вимірюється при довжині хвилі 470 нм. Для каротиноїдів також застосовують відповідні молекулярні абсорбційні коефіцієнти, що дозволяють визначити їх концентрацію за формулою:

$$C_{\text{карот.,мг/л}} = \frac{1000 \cdot D_{441} - 3,27 \cdot C_{chl.a} - 100 \cdot C_{chl.b}}{229}, \quad (2.3)$$

де $C_{\text{карот.}}$ – концентрація каротиноїдів, мг/л; D_{441} – оптична густина при довжині хвилі 441 нм; $C_{chl.a}$ – концентрація хлорофілу a, мг/л; $C_{chl.b}$ – концентрація хлорофілу b, мг/л.

Для визначення вмісту фотосинтетичних пігментів у рослинних зразках використовується розрахунок концентрації пігментів на одиницю маси рослинного матеріалу. Оскільки фотосинтетичні пігменти, такі як хлорофіли та каротиноїди, розчиняються в екстрактах, важливо точно визначити їх концентрацію та врахувати масу рослинного матеріалу.

Вміст пігментів у зразках розраховується на основі концентрації пігменту в екстракті, об'єму екстракту та маси наважки рослинного матеріалу. Для цього використовується наступна формула:

$$A_{\text{мг/г}} = \frac{C \cdot V}{H \cdot 1000}, \quad (2.4)$$

де $A_{\text{мг/г}}$ – вміст пігментів у рослинному зразку, мг/г; C – концентрація пігменту в екстракті, мг/л; V – об'єм екстракту, 10 мл; H – маса наважки рослинного матеріалу, 100 мг.

Для оцінки точності вимірювань використовуються контрольні зразки з відомою концентрацією пігментів. Також проводяться повторні вимірювання для кожного екстракту, щоб оцінити повторюваність результатів. Такий підхід дозволяє мінімізувати похибки вимірювань і гарантувати точність отриманих результатів [30].

2.4. Визначення активності каталази.

Для визначення активності каталази в рослинних зразках використовували спектрофотометричний метод, який ґрунтується на здатності перексиду водню (H_2O_2) утворювати стійкий комплекс жовтого кольору. Інтенсивність цього комплексу вимірюють на спектрофотометрі при довжині хвилі 410 нм.

Активність каталази оцінюється через її здатність каталізувати розклад перекису водню до води та кисню, що супроводжується зміною кольору розчину, який і фіксується за допомогою спектрофотометра.

Для проведення аналізу використовували кілька основних реактивів, серед яких 4% розчин амонію молібдату $(NH_4)_2MoO_4$, 0,03% розчин перекису водню (H_2O_2) та 1 М фосфатний буфер, що підтримує необхідне значення рН для оптимальної роботи каталази під час реакції.

Процес визначення активності каталази починається з підготовки екстракту, де наважку листя гарбуза розчинили у фосфатному буфері (рис.2.8). Після цього до зразка додали молібдат амонію та інкубували у водяній бані при температурі 37°C. Пробірки центрифугували для очищення від клітинних часток, а потім виміряли інтенсивність забарвлення розчину, що є пропорційною активності каталази.



Рисунок 2.8. Екстракти листя гарбуза для визначення активності каталази.

Розрахунок активності каталази здійснювався за спеціальною формулою, у якій враховуються оптичні густини досліджуваних проб, об'єм екстракту, час інкубації та маса рослинного матеріалу:

$$E = (A_{\text{хол}} - A_{\text{досл}}) \cdot V \cdot t \cdot \frac{K}{m}, \quad (2.5)$$

де E – активність каталази (мкат/мг); $A_{\text{хол}}$ – екстинція холостої проби (замість пероксиду водню внесли дистильовану воду); $A_{\text{досл}}$ – екстинція дослідної проби; V – обсяг внесеної проби, 0,1 мл; t – час інкубації, 600 с; m – маса тканини при внесенні проби, мг; K – коефіцієнт мілімолярної екстинції пероксиду водню ($22,2 \cdot 10^3 \text{ мМ}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$).

У результаті цієї процедури можна отримати точну оцінку каталазної активності, що є важливим показником для біохімічних досліджень у фізіології рослин та їх реакцій на різні умови середовища.

Представлена формула дозволяє точно визначити активність каталази, оскільки вона враховує інтенсивність забарвлення та різні фактори, пов'язані з умовами інкубації і обробки зразків [31].

2.5. Статистична обробка даних.

Для статистичної обробки отриманих результатів використовувалися загальноприйняті методи, які дозволяють оцінити достовірність та варіативність даних. Усі дослідження виконувалися тричі, що дозволило збільшити точність отриманих результатів і знизити похибку.

Для порівняння середніх значень різних груп використовувався t-тест для незалежних вибірок, що дозволяє виявити, чи є статистично значущі відмінності між групами при різних умовах (з обробкою фулереном C_{60} та без нього). Цей тест був обраний через свою простоту та надійність при обробці даних з невеликою кількістю спостережень.

Для визначення варіативності даних використовувався розрахунок стандартного відхилення, що дозволяє оцінити рівень розкиду значень навколо середнього. Це важливо для оцінки стабільності результатів та їх достовірності.

Усі дані були оброблені за допомогою програмного забезпечення Microsoft Excel, що є зручним інструментом для обчислень та побудови графіків. Статистична значущість визначалась при $p < 0,05$, що свідчить про значну різницю між групами результатів.

РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ АНАЛІЗ

3.1. Вплив фулерену C₆₀ на морфометричні показники гарбуза за умов водного дефіциту.

Для детального вивчення фізіологічних процесів та оцінки стану рослин у ході дослідження використовувалися різноманітні морфометричні параметри, що дозволяють комплексно оцінити їхній розвиток за певний період часу. Визначення таких параметрів, як довжина пагона, довжина кореня, кількість листків, діаметр пагона та маса рослини, є необхідним для оцінки реагування рослин на водний стрес.

Довжина пагона відображала інтенсивність ростових процесів і адаптаційну реакцію рослин на умови водозабезпечення. Довжину кореня вимірювали після очищення кореневої системи від ґрунту, що дало змогу об'єктивно оцінити розвиток підземної частини. Кількість листків визначали шляхом підрахунку, як показник фотосинтетичної активності. Діаметр пагона вимірювали на рівні основи, що характеризувало розвиток провідної системи та стійкість до стресу. Маса рослини слугувала інтегральним показником загального стану та біомаси надземної і підземної частин [32].

Дослідження впливу фулерену C₆₀ на морфометричні показники сорту гарбуза «Український багатоплідний» за умов нормального зволоження показало значні зміни в довжині пагону, довжині кореня, кількості листків, діаметрі пагону та масі рослин, залежно від концентрації фулерену. Для дослідження використовувались концентрації фулерену C₆₀: 0,1 мкг/мл, 0,2 мкг/мл, 0,5 мкг/мл і 1 мкг/мл (табл.3.1.).

Таблиця 3.1. Морфометричні показники гарбуза сорту «Український багатоплідний» за умов нормального зволоження при обробці фулереном C_{60}

Варіант	Довжина пагону, см	Довжина кореня, см	Кількість листків, шт	Маса рослин, г	Діаметр пагону, см
Контроль	16,8	16,0	2,9	2,099	0,36
C_{60} 0,1 мкг/мл	17,5	17,0	3	2,309	0,38
C_{60} 0,2 мкг/мл	19,0	17,5	3,6	2,858	0,4
C_{60} 0,5 мкг/мл	18,7	16,8	3,0	2,566	0,34
C_{60} 1 мкг/мл	16,3	15,7	2,9	2,027	0,31

При концентрації 0,1 мкг/мл морфометричні показники рослин були на рівні контролю. Концентрація 0,2 мкг/мл фулерену призвела до незначного зростання показників. Довжина і діаметр пагону, довжина кореня залишалась на рівні контролю. Кількість листків зросла на 24% та маса рослин зросла на 36%, що є значним покращенням порівняно з контрольними зразками. Результати вказують на те, що концентрація фулерену C_{60} стимулює ріст рослин, сприяючи кращому розвитку як надземних, так і підземних органів.

За концентрації 0,5 мкг/мл фулерену C_{60} морфометричні показники також були на рівні контролю: довжина пагону, довжина кореня та кількість листків листків дещо збільшилися. Маса рослин зросла на 22% у порівнянні з контролем, що вказує на насичення ефекту при вищих концентраціях. Однак, при найвищій концентрації 1 мкг/мл фулерену спостерігалось незначне зменшення довжини та діаметру пагону, довжини кореня, маси рослин, а також кількості листків. Результати свідчать про негативну дію фулерену C_{60} (рис. 3.1.).

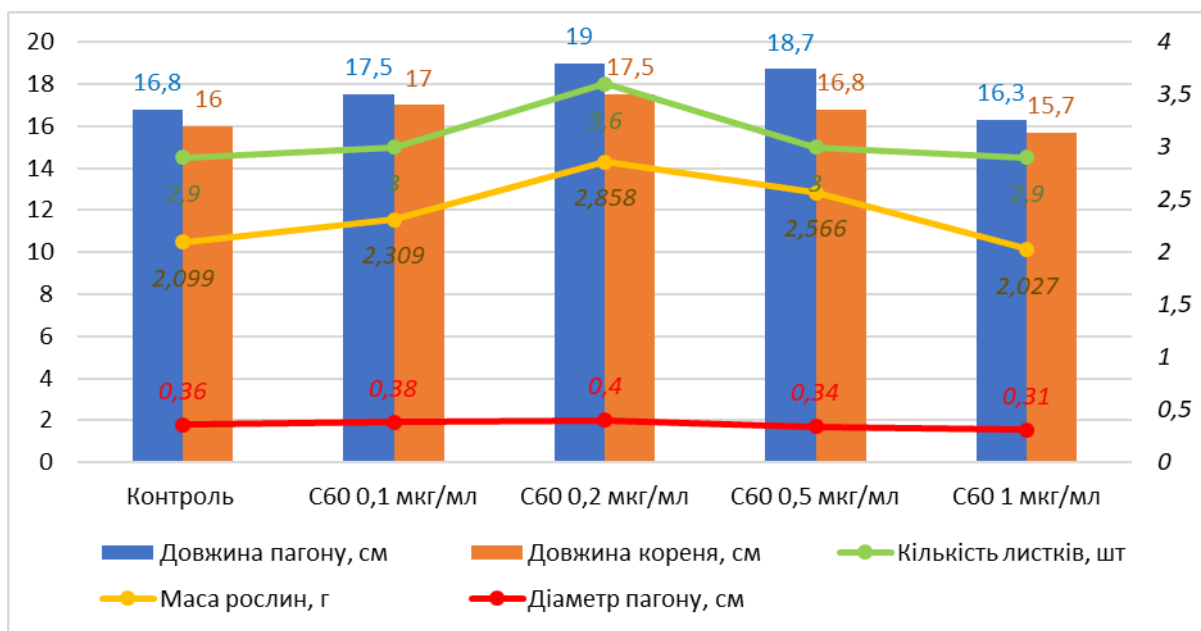


Рисунок 3.1. Морфометричні показники гарбуза «Український багатоплідний» при обробці фулереном С₆₀ за нормального зволоження на 14 день експерименту.

Вплив фулерену С₆₀ на морфометричні показники сорту гарбуза «Український багатоплідний» за умов водного дефіциту відрізнявся від результатів при нормальному зволоженні, однак ефект все одно виявився позитивним. За умов посухи рослини зазнають стресу, що негативно впливає на їх ріст та розвиток, проте обробка вуглецевим наноматеріалом сприяла позитивним змінам у морфометричних показниках (табл.3.2.)

Таблиця 3.2. Морфометричні показники гарбуза сорту «Український багатоплідний» за умов водного дефіциту при обробці фулереном С₆₀ різних концентрацій.

Варіант	Довжина пагону, см	Довжина кореня, см	Кількість листків, шт	Маса рослин, г	Діаметр пагона, см
Контроль	9,9	11,6	2,6	1,388	0,27
C ₆₀ 0,1 мкг/мл	11,0	15,5	2,9	1,958	0,33
C ₆₀ 0,2 мкг/мл	14,9	14,7	3,0	2,016	0,34
C ₆₀ 0,5 мкг/мл	13,3	13,1	2,9	1,841	2,9
C ₆₀ 1 мкг/мл	9,5	13,7	2,9	1,381	2,9

При концентрації 0,1 мкг/мл фулерену C₆₀ спостерігалися позитивні зміни у морфометричних показниках: довжина пагону збільшилась на 11%, довжина кореня – на 34%, кількість листків – на 12%, діаметр пагону – на 22%, а маса рослин – на 41% порівняно з контрольними зразками. Результати свідчать про те, що фулерен C₆₀ при низькій концентрації має позитивний вплив на ріст рослин в умовах стресу, підтримуючи їх розвиток навіть за водного дефіциту.

При концентрації 0,2 мкг/мл спостерігалось ще більше підвищення морфометричних показників: довжина пагону зростала на 51%, довжина кореня – на 27%, кількість листків – на 15%, діаметр пагону – на 26%, маса рослин – на 45% порівняно з контролем. Такий ефект підтверджує, що концентрація 0,2 мкг/мл є оптимальною для захисту рослин від дії посухи та стимулювання їхнього росту.

При концентрації 0,5 мкг/мл фулерену C₆₀ також спостерігалось покращення морфометричних показників, хоча ефект був менш вираженим порівняно з концентрацією 0,2 мкг/мл. Довжина пагону збільшилась на 34%, довжина кореня – на 13%, кількість листків – на 12%, діаметр пагону – на 7% та маса рослин на – 33%, порівняно з контролем. Це свідчить про те, що концентрація 0,5 мкг/мл має помірний стимулюючий ефект на ріст рослин, проте його інтенсивність знижується порівняно з більш низькими дозами. Такі результати можуть вказувати на насичення ефекту стимуляції, коли оптимальний вплив досягається при меншій концентрації.

При максимальній досліджуваній концентрації 1 мкг/мл фулерену C₆₀ ефект був менш вираженим порівняно з попередніми концентраціями. Спостерігалось зростання: довжина кореня збільшилась на 18%, кількість листків – на 12%, а діаметр пагону – на 7%. Це свідчить про те, що висока концентрація фулерену C₆₀ умовах водного дефіциту не дає вираженого стимулюючого ефекту і в цілому показники залишаються на рівні з контролем, що може свідчити про відсутність значного позитивного впливу при такій концентрації (рис.3.2.).

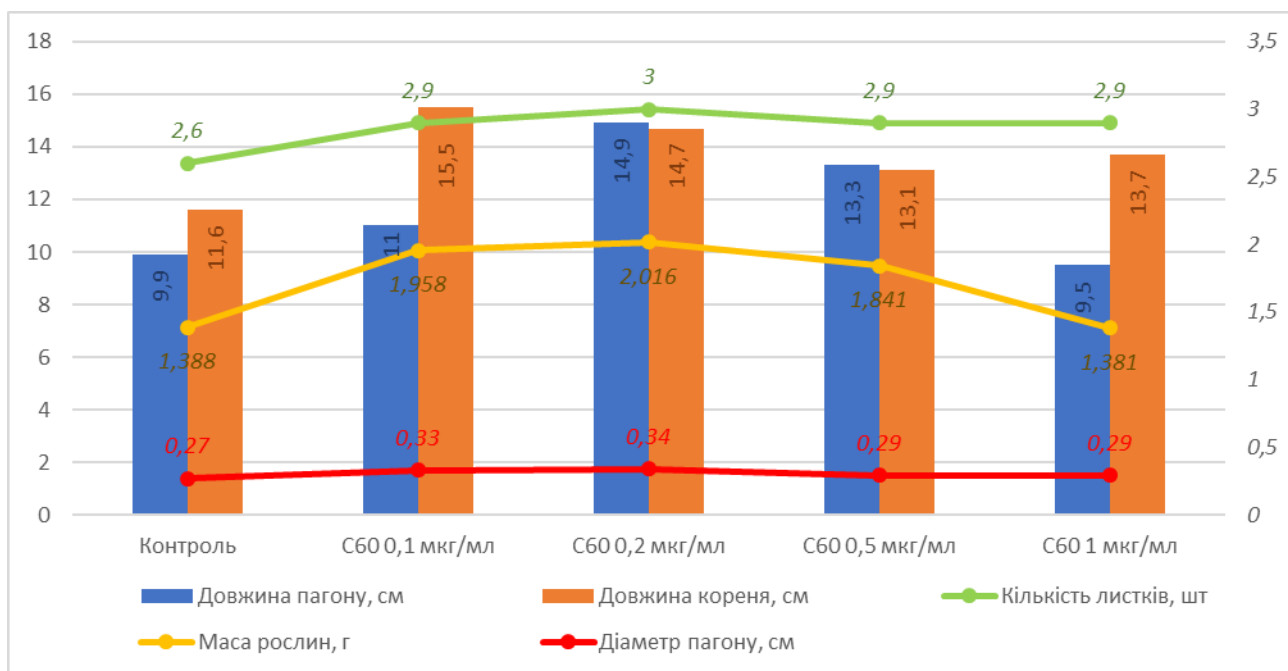


Рисунок. 3.2. Морфометричні показники гарбуза «Український багатоплідний» при обробці фулереном С₆₀ за водного дефіциту на 14 день експерименту.

Вплив фулерену С₆₀ на морфометричні показники сорту гарбуза «Волзький сірий» за умов нормального зволоження виявився залежним від концентрації наноматеріалу. Обробка рослин різними дозами фулерену призводила до покращення основних показників росту (табл.3.3.).

При концентрації 0,1 мкг/мл фулерену С₆₀ довжина пагону збільшилася на 8% порівняно з контролем, довжина кореня зросла на 11%, а кількість листків збільшилась на 13%. Маса рослин також зросла на 8%, а діаметр пагону збільшився на 13%. Цей ефект свідчить про початковий стимулюючий ефект наноматеріалу на ріст рослин.

Таблиця 3.3. Морфометричні показники гарбуза сорту «Волзький сірий» за умов нормального зволоження при обробці фулереном С₆₀ різних концентрацій.

Проба	Довжина пагону, см	Довжина кореня, см	Кількість листків, шт	Маса рослин, г	Діаметр пагона, см
Контроль	12,6	12,7	3,0	2,566	0,39
С ₆₀ 0,1 мкг/мл	13,6	14,1	3,4	2,766	0,44
С ₆₀ 0,2 мкг/мл	15,3	16,8	3,7	3,243	0,5
С ₆₀ 0,5 мкг/мл	14,3	13,7	3,0	3,008	0,49
С ₆₀ 1 мкг/мл	13,2	12,6	3,0	2,918	0,4

При концентрації 0,2 мкг/мл фулерену C_{60} ефект став більш вираженим: довжина пагону зросла на 21%, довжина кореня – на 32%, кількість листків збільшилася на 20%, маса рослин зросла на 26%, а діаметр пагону – на 28% порівняно з контролем. Такі показники вказують на оптимальність цієї концентрації для стимулювання росту рослин.

Обробка концентрацією 0,5 мкг/мл фулерену C_{60} призвела до гіршого ефекту порівняно з концентрацією 0,2 мкг/мл, але показники залишалися вищими за контрольні: довжина пагону збільшилась на 14%, довжина кореня на 8%, кількість листків залишилася на рівні контролю, маса рослин зросла на 17%, а діаметр пагону збільшився на 13%, порівняно з контрольними зразками. Результати свідчать про можливе насичення стимулюючого ефекту при підвищених концентраціях фулерену.

Концентрація 1 мкг/мл фулерену C_{60} – мала найменший позитивний вплив, серед досліджуваних зразків: довжина пагону зросла лише на 5%, довжина кореня на 4%, кількість листків навіть зменшилася на 3%, маса рослин збільшилась на 14%, а діаметр пагону підвищився лише на 3%. Такий результат може свідчити про зниження ефективності фулерену при максимальних концентраціях (рис.3.3.).

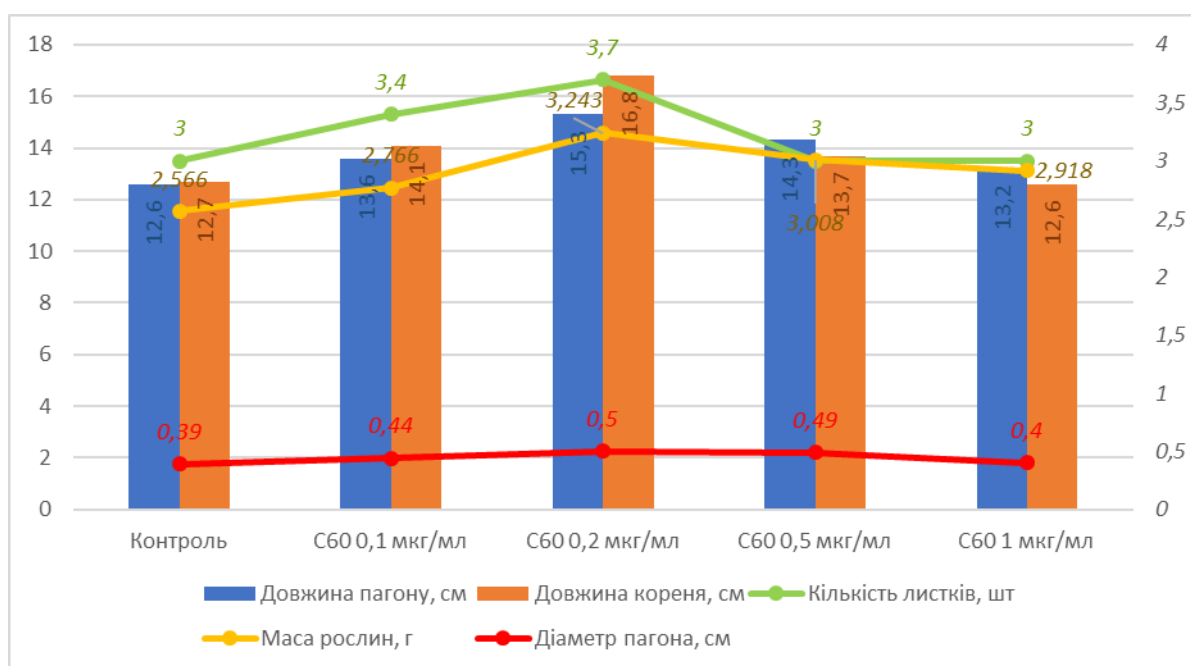


Рисунок 3.3. Морфометричні показники гарбуза «Волзький сірий» при обробці фулереном C_{60} за нормального зволоження на 14 день експерименту.

Вплив фулерену C_{60} на морфометричні показники сорту гарбуза «Волзький сірий» за умов водного дефіциту виявився помітно вираженим, хоча і відрізнявся від ефекту, спостереженого при нормальному зволоженні (табл.3.4).

Таблиця 3.4. Морфометричні показники гарбуза сорту «Волзький сірий» за умов нормального зволоження при обробці фулереном C_{60}

Проба	Довжина пагону, см	Довжина кореня, см	Кількість листків, шт	Маса рослин, г	Діаметр пагона, см
Контроль	8,6	10,6	2,7	1,294	0,31
C_{60} 0,1 мкг/мл	9,0	13,4	3	1,772	0,34
C_{60} 0,2 мкг/мл	10,5	16,9	3,4	2,283	0,46
C_{60} 0,5 мкг/мл	9,7	14,2	3	1,839	0,4
C_{60} 1 мкг/мл	8,9	13	3	1,3940	0,29

При концентрації 0,1 мкг/мл фулерену C_{60} довжина пагону збільшувалася на 5%, довжина кореня – на 26%, кількість листків – на 26%, діаметр пагону – на 10%, а маса рослин – на 37%, порівняно з контрольними зразками. Діаметр пагона також зріс на 10%. Ці результати свідчать про стимулюючий ефект фулерену, навіть за умов водного дефіциту, покращуючи загальний ріст рослин.

При концентрації 0,2 мкг/мл фулерену C_{60} спостерігався ще більш виразний стимулюючий ефект. Довжина пагона збільшилася на 22%, довжина кореня на 59%, кількість листків зросла на 26%, маса рослин збільшилася на 76%, а діаметр пагону збільшився на 48%. Ці результати свідчать про те, що фулерен при концентрації 0,2% має максимальний позитивний вплив на ріст рослин навіть за умов водного дефіциту.

При концентрації 0,5 мкг/мл фулерену C_{60} ефект був менш вираженим, хоча все ще спостерігалось покращення показників. Довжина пагону збільшилась на 13%, довжина кореня – на 34%, кількість листків зросла – на 12%, маса рослин – на 33%, а діаметр пагону – на 29%. Можна зробити висновок, що концентрація 0,5 мкг/мл фулерену також може стимулювати ріст

рослин за умов водного дефіциту, але ефект знижується порівняно з концентрацією 0,2 мкг/мл.

При концентрації 1 мкг/мл фулерену C_{60} спостерігався найменший ефект за умов водного дефіциту. Довжина пагону зросла лише на 4%, довжина кореня на 16%, кількість листків залишалася на рівні контролю, маса рослин зменшилася на 1%, а діаметр пагону збільшився лише на 7%, порівняно з контролем. Це свідчить про те, що при високих концентраціях фулерену стимулюючий ефект значно знижується, а при надмірному використанні може навіть бути шкідливим для рослин (рис.3.4.).

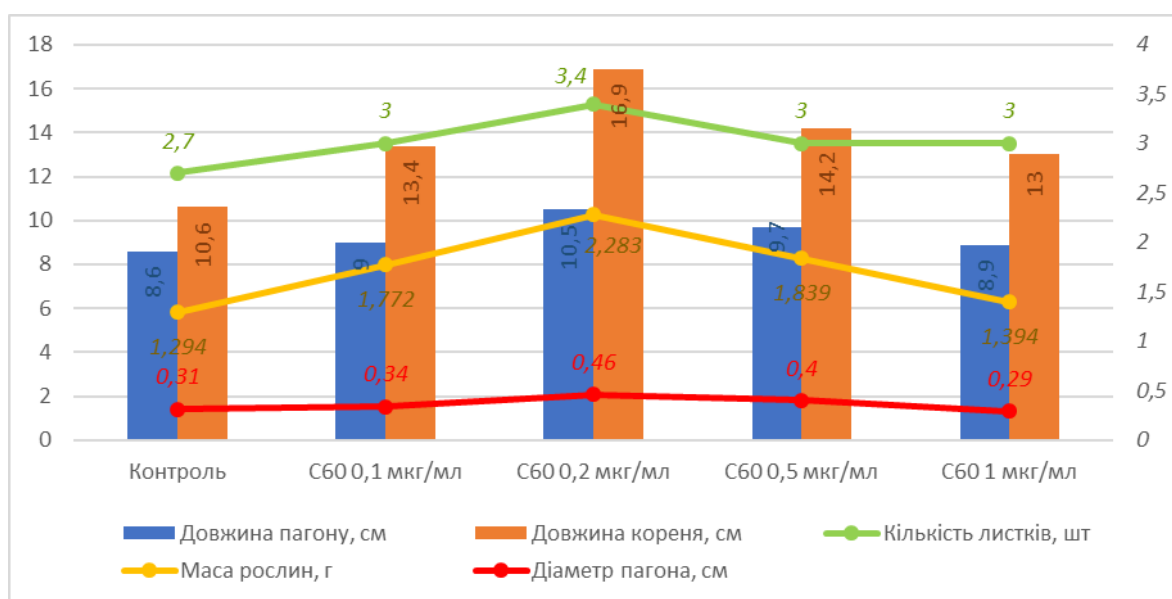


Рисунок 3.4. Морфометричні показники гарбуза «Волзький сірий» при обробці фулереном C_{60} за водного дефіциту.

Проведене порівняльне дослідження дозволило виявити міжвидові відмінності у реакції двох сортів гарбуза – «Український багатоплідний» та «Волзький сірий» – на дію фулерену C_{60} за умов як нормального зволоження, так і водного дефіциту. Отримані результати свідчать про те, що обидва сорти реагують на дію фулерену, однак характер цієї реакції, інтенсивність змін та оптимальні концентрації наноматеріалу суттєво відрізняються.

Сорт «Український багатоплідний» проявив чутливішу реакцію на обробку фулереном у стресових умовах водного дефіциту. При концентрації 0,2 мкг/мл було зафіксовано максимальне збільшення морфометричних показників,

що свідчить про високу ефективність фулерену саме для цього сорту в умовах посухи. Зокрема, довжина пагону зростає на понад 50% порівняно з контролем, що є найвищим значенням серед усіх досліджених варіантів.

Натомість сорт «Волзький сірий» краще реагував на обробку фулереном C_{60} за умов нормального зволоження. Найбільш виражені зміни морфометричних показників у цьому сорті також спостерігались при концентрації 0,2 мкг/мл, проте приріст не був таким значним, як у «Українського багатоплідного» за водного дефіциту. Це свідчить про більшу стабільність та потенційно вищу адаптивність сорту «Український багатоплідний» до несприятливих умов вирощування при наявності зовнішніх стимуляторів росту.

Також варто зазначити, що при концентрації 1 мкг/мл обидва сорти демонстрували ознаки незначного зниження ростових показників, однак у «Волзького сірого» ці зміни були менш різкими. Це може свідчити про кращу переносимість надлишку наноматеріалу, або про особливості метаболічної відповіді, характерної для цього сорту.

3.2. Вплив фулерену C_{60} на вміст фотосинтетичних пігментів у гарбуза за умов водного дефіциту.

Визначення вмісту фотосинтетичних пігментів є важливою частиною вивчення фізіології рослин та дозволяє оцінити ефективність фотосинтезу та стан рослини. Вплив фулерену C_{60} на вміст фотосинтетичних пігментів сорту гарбуза «Український багатоплідний» за умов нормального зволоження був оцінений на різних концентраціях цього наноматеріалу. Фотосинтетичні пігменти, зокрема хлорофіли а та b, а також каротиноїди, є основними пігментами, які відповідають за процес фотосинтезу, тому їх зміни можуть вказувати на рівень ефективності фотосинтетичних процесів рослин.

За умов оптимального зволоження рослини, оброблені фулереном C_{60} , продемонстрували зміни у вмісті фотосинтетичних пігментів, причому ці зміни залежали від концентрації наноматеріалу. У групах, де використовувалися

концентрації 0,1 мкг/мл і 0,2 мкг/мл фулерену, спостерігалось підвищення вмісту хлорофілу а, хлорофілу b та каротиноїдів порівняно з контрольними рослинами.

Зокрема, при концентрації 0,2 мкг/мл хлорофіл а збільшився на 14%, хлорофіл b – на 11%, а каротиноїди – на 12%. Це свідчить про стимулюючий ефект фулерену, який може покращувати фотосинтетичну активність рослин, підвищуючи ефективність використання світла для синтезу органічних сполук.

Фулерен C_{60} за концентрацій 0,5 та 1 мкг/мл не впливав на вміст пігментів, порівняно з контрольними зразками. (рис.3.5.).

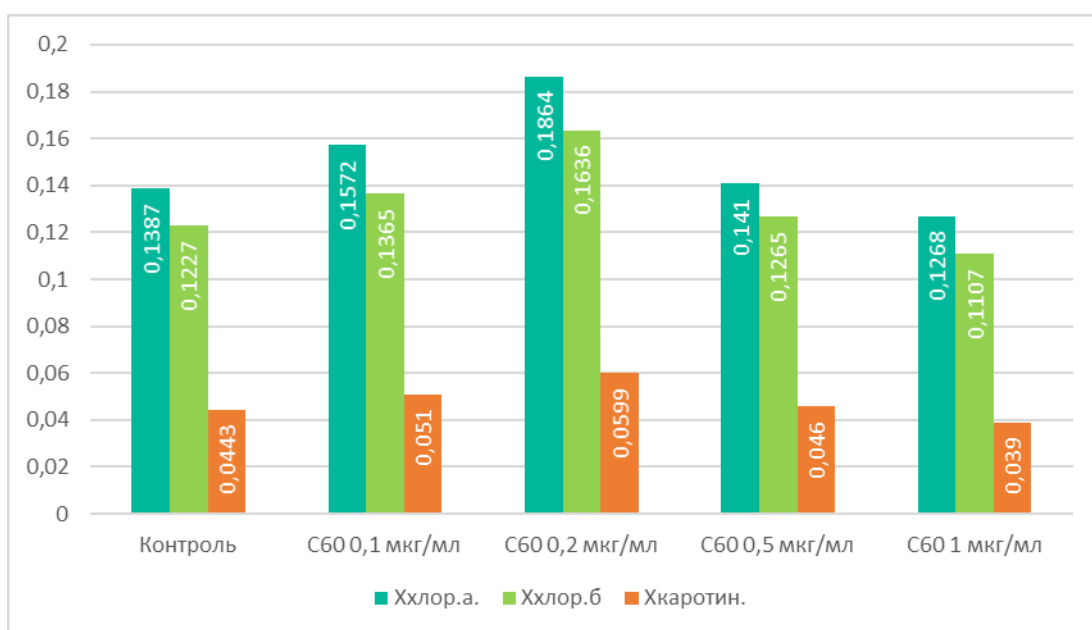


Рисунок 3.5. Вміст пігментів у гарбуза сорту «Український багатоплідний» при обробці фулереном C_{60} за нормального зволоження на 14 день експерименту.

Вплив фулерену C_{60} на вміст фотосинтетичних пігментів сорту гарбуза «Український багатоплідний» за умов водного дефіциту виявився мав концентраційно залежний характер. В умовах дефіциту вологи у контрольних рослин спостерігалось зниження вмісту пігментів порівняно за умов нормального поливу: вміст хлорофілу а та b, а також каротиноїдів були суттєво нижчими, що є типовою реакцією на водний стрес.

Після обробки фулереном C_{60} за концентрації 0,1 мкг/мл вміст фотосинтетичних пігментів незначно підвищувався: хлорофілу а на 10%, хлорофілу b – на 8%, а каротиноїдів – на 10% порівняно з контролем за тих же

умов. Результати свідчать про здатність фулерену частково компенсувати негативний вплив водного стресу, підтримуючи фотосинтетичну активність рослин.

При концентрації 0,2 мкг/мл фулерену спостерігалось значне підвищення вмісту пігментів: хлорофілу а – на 30%, хлорофілу b – на 27%, а каротиноїдів – на 28% у порівнянні з контролем. Результати вказують, що саме ця концентрація є оптимальною для покращення фотосинтетичної активності та підвищення стійкості рослин до водного дефіциту.

При концентрації 0,5 мкг/мл фулерену C_{60} зміни у вмісті фотосинтетичних пігментів були незначними: хлорофіл а знизився на 2%, хлорофіл b – на 3%, а каротиноїди залишились практично на рівні контролю, що свідчить про відсутність виразного стимулюючого ефекту.

Натомість при концентрації 1 мкг/мл спостерігалось суттєве зниження вмісту хлорофілів та каротиноїдів – хлорофіл а знизився на 19%, хлорофіл b – на 16%, а каротиноїди – на 13% порівняно з контролем. Така динаміка вказує на можливий токсичний вплив надмірної дози фулерену, що негативно впливає на фотосинтетичну активність рослин.

Отже, результати свідчать, що фулерен C_{60} у помірних концентраціях, зокрема 0,2 мкг/мл, ефективно покращує вміст фотосинтетичних пігментів у рослин сорту «Український багатоплідний» за умов водного дефіциту, сприяючи підвищенню їх стійкості до стресу. Водночас надмірні концентрації наноматеріалу можуть мати токсичний вплив, що обмежує їх застосування та потребує ретельного підбору дозування для досягнення оптимального результату (рис.3.6.).

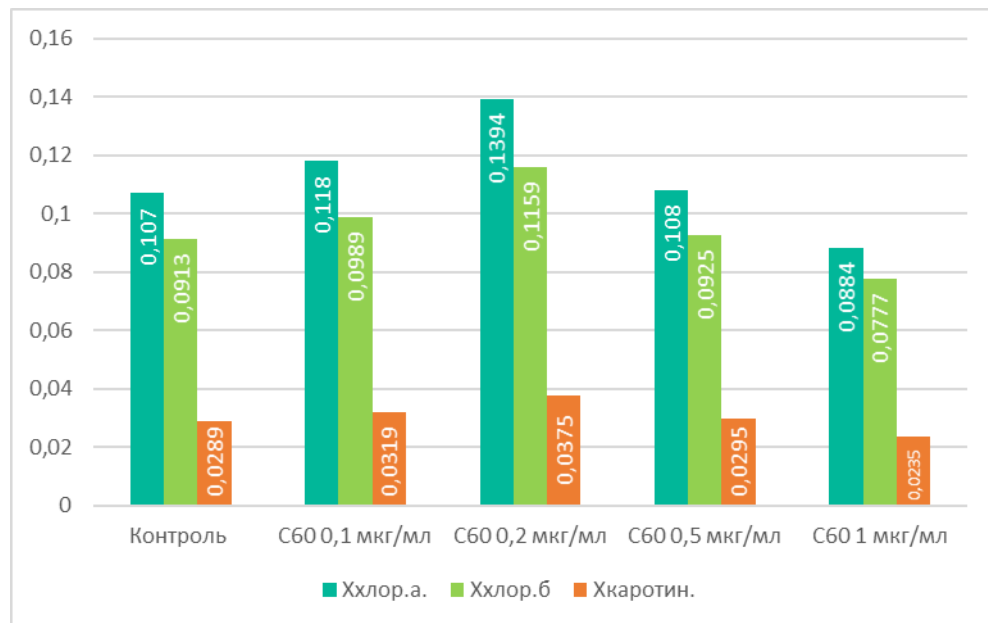


Рисунок 3.6. Вміст пігментів у гарбуза сорту «Український багатоплідний» при обробці фулереном C₆₀ за водного дефіциту на 14 день експерименту.

Дослідження впливу фулерену C₆₀ на вміст фотосинтетичних пігментів у гарбуза сорту «Волзький сірий» за умов нормального зволоження спрямовувалося на виявлення змін у концентраціях основних пігментів – хлорофілу а, хлорофілу b та каротиноїдів, залежно від різних доз наноматеріалу. Отримані дані свідчать, що вплив фулерену варіює залежно від концентрації і може проявлятися як у вигляді стимулюючого, так і пригнічувального ефекту на фотосинтетичну активність рослин.

При концентрації 0,1 мкг/мл спостерігалось збільшення вмісту хлорофілу а на 15%, хлорофілу b – на 13% та каротиноїдів – на 9% у порівнянні з контролем, що свідчить про початкову стимуляцію фотосинтетичної активності та покращення світлозасвоєння рослин.

З підвищенням концентрації до 0,2 мкг/мл збільшення пігментів стало більш вираженим: хлорофіл а зріс на 28%, хлорофіл b – на 30%, каротиноїди – на 22%. Це свідчить про оптимальність цієї дози для підтримки фотосинтетичних процесів і загального стану рослин.

Водночас фулерен за концентрації 0,5 мкг/мл не впливав на вміст пігментів за умови.

При максимальній дослідній концентрації 1 мкг/мл фулерену спостерігалось незначне зниження вмісту фотосинтетичних пігментів у порівнянні з контролем: хлорофіл а зменшився на 10%, хлорофіл b – на 8%, каротиноїди – на 14%. Це вказує на можливий токсичний ефект високих доз фулерену, який пригнічує фотосинтетичну активність.

Отже, для сорту «Волзький сірий» за нормального зволоження оптимальною є концентрація 0,2 мкг/мл, яка збільшує вміст фотосинтетичних пігментів і стимулює фотосинтез. Вищі дози не покращують результати і можуть бути шкідливими, тому важливо правильно дозувати наноматеріал (рис.3.7).

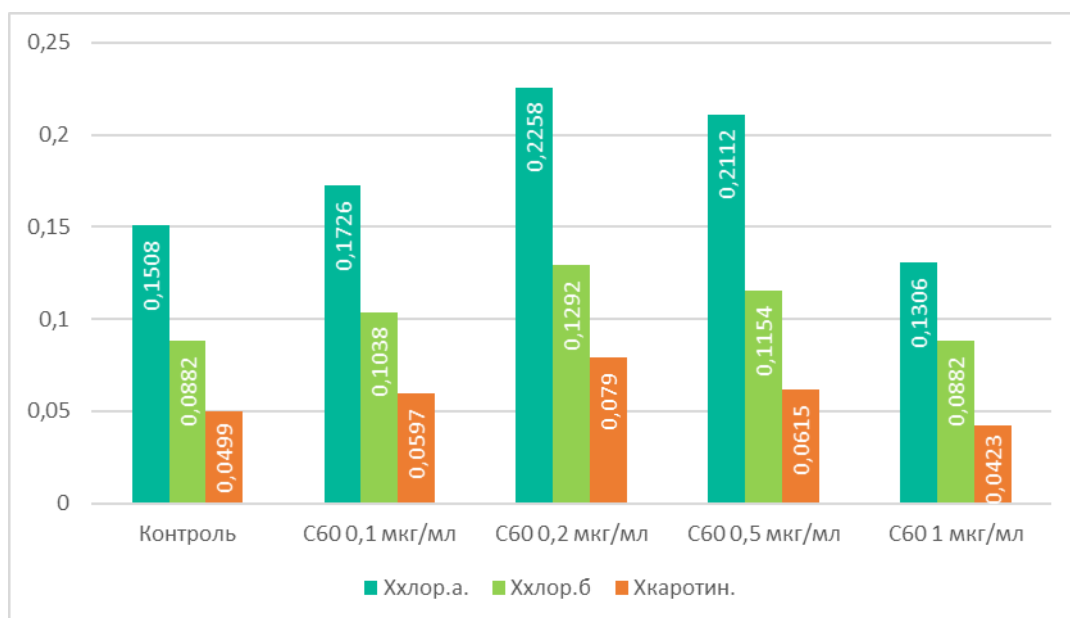


Рисунок 3.7. Вміст пігментів у гарбуза сорту «Волзький сірий» при обробці фулереном C₆₀ за водного дефіциту на 14 день експерименту.

Вплив фулерену C₆₀ на вміст фотосинтетичних пігментів у сорту гарбуза «Волзький сірий» за умов водного дефіциту продемонстрував значні зміни, що були залежними від концентрації наноматеріалу. В умовах дефіциту води контрольні рослини зазнали зниження концентрації хлорофілу а, хлорофілу b та каротиноїдів порівняно з рослинами, вирощеними за нормального зволоження, що свідчить про типову реакцію на водний стрес і пригнічення фотосинтетичної активності.

Обробка фулереном C_{60} при концентрації 0,1 мкг/мл сприяла помірному підвищенню рівня фотосинтетичних пігментів. Зокрема, вміст хлорофілу а збільшився на 12%, хлорофілу b – на 9%, а каротиноїдів – на 7% порівняно з контрольними рослинами за тих же умов. Такий результат свідчить про здатність фулерену частково компенсувати вплив водного дефіциту, підтримуючи фотосинтетичні процеси.

При концентрації 0,2 мкг/мл відзначалося більш виражене збільшення фотосинтетичних пігментів: хлорофіл а зріс на 26%, хлорофіл b – на 23%, а каротиноїди – на 21%. Ці дані вказують на те, що дана концентрація є найбільш ефективною для підтримки фотосинтезу та покращення стійкості рослин сорту «Волзький сірий» за умов водного стресу.

Водночас концентрація 0,5 мкг/мл не вплинула на рівень пігментів, які залишились на рівні контрольних значень: хлорофіл а знизився на 1%, хлорофіл b – на 1%, каротиноїди – на 2%. Такі зміни свідчать про незначне пригнічення фотосинтетичної активності рослин за цієї концентрації наноматеріалу.

При концентрації 1 мкг/мл спостерігається більш суттєве зниження пігментів: хлорофіл а зменшився на 20%, хлорофіл b – на 20%, а каротиноїди – на 17% у порівнянні з контролем. Це вказує на токсичний вплив фулерену C_{60} при високій концентрації, що негативно позначається на фотосинтетичних процесах та загальному стані рослин (рис.3.8.).

Дослідження впливу фулерену C_{60} на фотосинтетичні пігменти у сортах «Український багатоплідний» та «Волзький сірий» виявило суттєві міжвидові відмінності. «Український багатоплідний» показав більшу чутливість до фулерену, особливо при концентраціях 0,1–0,2 мкг/мл, з помітним збільшенням пігментів навіть за водного дефіциту. Водночас високі дози 1 мкг/мл викликали токсичний ефект. «Волзький сірий» демонстрував більш стабільну, але менш виражену реакцію, з менш різкими змінами пігментів і кращою переносимістю високих концентрацій.

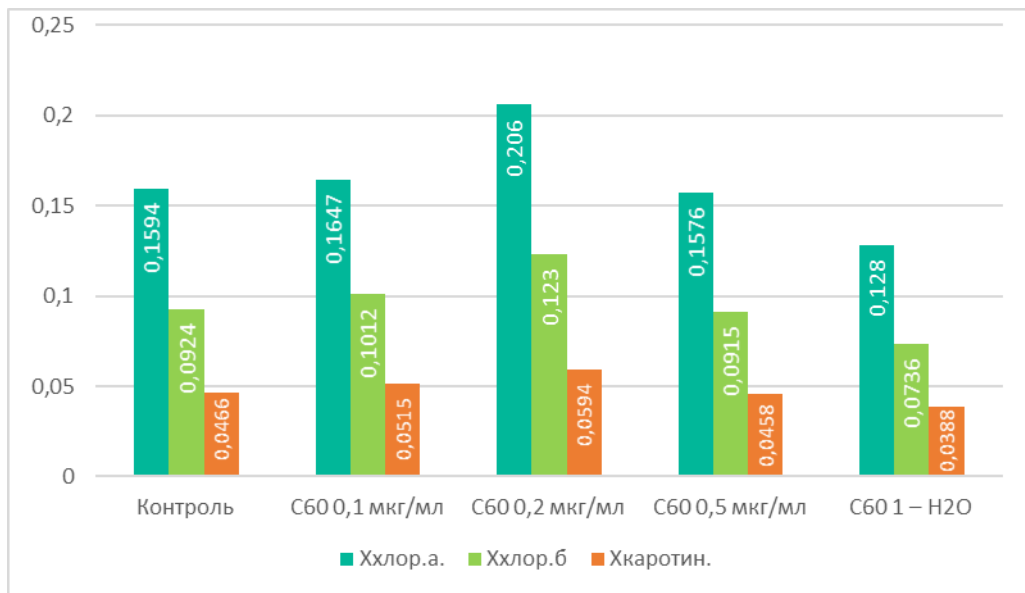


Рисунок 3.8. Вміст пігментів у гарбуза сорту «Волзький сірий» при обробці фулереном C_{60} за водного дефіциту на 14 день експерименту.

3.3. Вплив фулерену C_{60} на активність каталази у гарбуза за умов водного дефіциту.

Активність каталази є важливим індикатором реакції рослин на стресові умови, зокрема, водний дефіцит, оскільки цей фермент відіграє ключову роль у захисті клітин від окисного стресу, розщеплюючи перекис водню на воду та кисень.

У ході дослідження було встановлено міжвидові відмінності у активності каталази між сортами гарбуза «Український багатоплідний» та «Волзький сірий» при обробці фулереном C_{60} та умов поливу. Підвищена активність каталази в обох сортах за умов водного дефіциту та впливу фулерену є індикатором окисативного стресу, на який рослини реагують через активацію антиоксидантної системи. Водночас, більш виражене підвищення активності каталази у сорту гарбуза «Український багатоплідний» може свідчити про більш сильну реакцію на стрес, у той час як сорт гарбуза «Волзький сірий» демонструє менш виражену активність каталази при низьких концентраціях фулерену.

У сорту гарбуза «Український багатоплідний» активність каталази за умов нормального зволоження та водного дефіциту змінювалася залежно від концентрації фулерену C₆₀.

За нормального зволоження контрольні рослини демонстрували базовий рівень активності каталази. Обробка фулереном C₆₀ у низьких концентраціях – 0,1 мкг/мл і 0,2 мкг/мл – призвела до суттєвого зниження активності каталази на 20% і 41% відповідно, що свідчить про зниження рівня окисного стресу та зменшення потреби у ферментативному захисті. При збільшенні концентрації до 0,5 мкг/мл та 1 мкг/мл активність каталази зросла на 4% і 20% відповідно, що може свідчити про активацію ферменту у відповідь на підвищену дозу фулерену або початок адаптивної реакції рослини.

За умов водного дефіциту активність каталази у контрольних рослин була значно вищою, що відповідає типовій реакції на стрес, викликаний надлишком активних форм кисню. Обробка фулереном C₆₀ при концентраціях 0,1 мкг/мл та 0,2 мкг/мл спричинила різке зниження активності ферменту на 43% та 59% відповідно, що свідчить про зменшення окисного стресу завдяки антиоксидантній дії фулерену. Концентрація 0,5 мкг/мл сприяла частковому відновленню активності каталази, вона зменшилась на 11%, порівняно з контролем. Максимальна дослідна концентрація 1 мкг/мл навіть перевищила контрольний рівень, підвищившись на 18%, що відображає потенційний стрес від надмірної дози наноматеріалу (рис.3.9.).

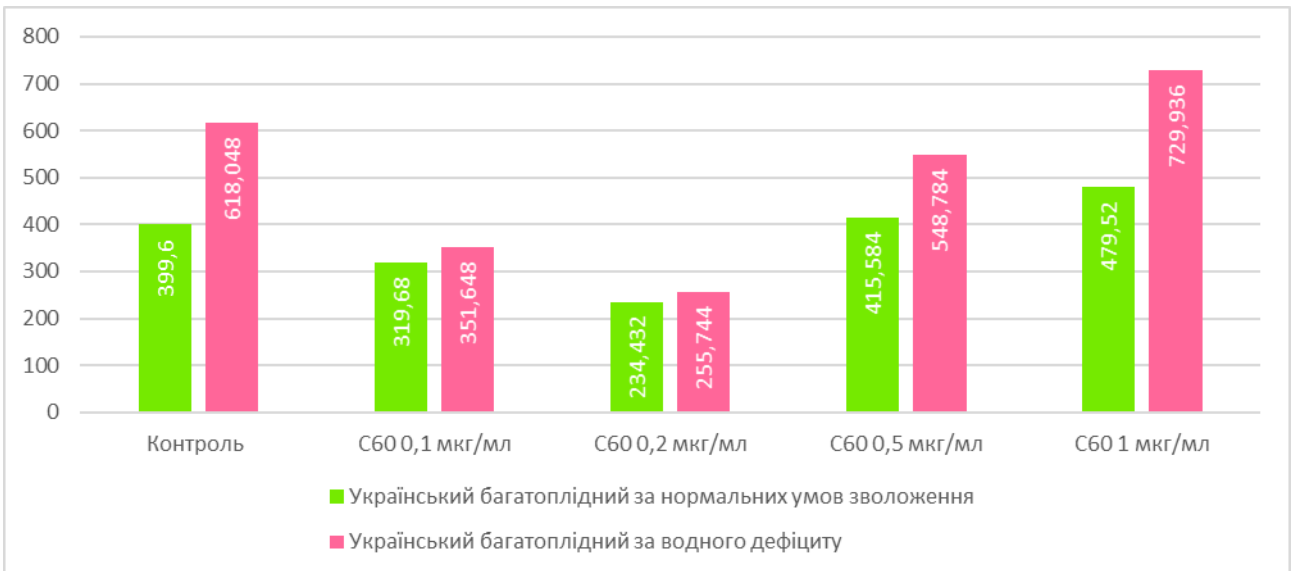


Рисунок 3.9. Активність каталази у гарбуза сорту «Український багатоплідний» при обробці фулереном C₆₀ за нормального зволоження та водного дефіциту на 14 день експерименту.

У сорту гарбуза «Волзький сірий» досліджено вплив різних концентрацій фулерену C₆₀ на активність каталази за умов нормального зволоження та водного дефіциту. За нормального зволоження активність каталази контрольних рослин прийнята за 100%. При обробці фулереном C₆₀ концентраціями 0,1 мкг/мл і 0,2 мкг/мл спостерігалось значне зниження активності ферменту на 47 % та 76 % від контролю відповідно, що свідчить про зменшення окисного стресу у рослин. При збільшенні концентрації до 0,5 мкг/мл активність каталази практично не змінилася – збільшилася на 1%, порівняно з контрольними зразками. А при 1 мкг/мл спостерігалось її підвищення на 44%, що може вказувати на стимуляцію ферментативної системи або початок токсичного ефекту.

За умов водного дефіциту активність каталази у контрольних рослин суттєво зросла, що свідчить про посилення антиоксидантних механізмів у відповідь на підвищений окисний стрес. Обробка фулереном C₆₀ у концентраціях 0,1 мкг/мл і 0,2 мкг/мл призвела до значного зниження активності на 51% і 69% відповідно. При концентрації 0,5 мкг/мл активність каталази знизилася на 13%, тоді як при 1 мкг/мл вона перевищила контроль і була більшою на 31%. Результати свідчать про здатність фулерену знижувати

окисний стрес у помірних дозах, а також про потенційну стимуляцію ферментативного захисту при високих концентраціях (рис.3.10).

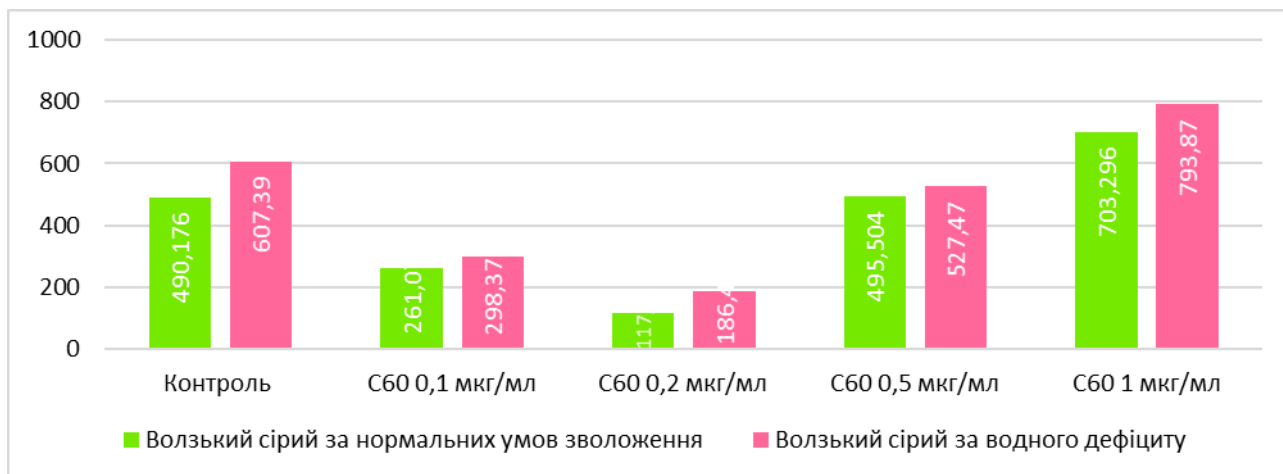


Рисунок 3.10. Активність каталази у гарбуза сорту «Український багатоплідний» при обробці фулереном C₆₀ за нормального зволоження та водного дефіциту на 14 день експерименту.

ВИСНОВКИ

Проведене дослідження дозволило встановити, що фулерен C₆₀ за концентрацій 0,1 мкг/мл, 0,2 мкг/мл, 0,5 мкг/мл та 1 мкг/мл впливає на фізіологічний стан рослин гарбуза звичайного (*Cucurbita pepo*), покращує морфометричні показники та фотосинтетичну активність як за умов нормального зволоження, так і водного дефіциту.

- 1. Морфометричні показники на ріст рослин.** Використання фулерену C₆₀ стимулювало ріст і розвиток надземних та підземних органів рослин, що проявляється у збільшенні довжини пагонів, коренів, кількості листків, а також маси і діаметра стебла. Найбільш виражений позитивний ефект спостерігався за концентрації 0,2 мкг/мл, що свідчить про оптимальну концентрацію наночастинок для покращення та регуляції ростових процесів.
- 2. Фотосинтетичні пігменти.** Виявлено підвищення вмісту фотосинтетичних пігментів – хлорофілу а, хлорофілу b та каротиноїдів. За концентрації фулерену C₆₀ – 0,2 мкг/мл підвищувався вміст пігментів тоді як за високої концентрації фулерену 1 мкг/мл вміст пігментів знижувався.
- 3. Активність каталази.** Активність каталази за дії фулерену C₆₀ знижувалася за концентрації 0,2 мкг/мл, тоді як за концентрації 1 мкг/мл підвищувалася, що свідчить про активацію ферментативного захисту у відповідь на потенційний стрес спричинений водним дефіцитом
- 4. Вплив фулерену C₆₀ на гарбуз звичайний (*Cucurbita pepo*) за водного дефіциту.** Фулерен C₆₀ допомагає зменшити негативний вплив водного дефіциту. Завдяки антиоксидантним властивостям, він зменшує рівень окисного стресу, захищаючи клітинні мембрани та фотосинтетичний апарат від ушкоджень. Фулерен також підтримує фотосинтетичні пігменти та газообмін, що дозволяє ефективніше використовувати наявну

вологу. Крім того, він стимулює розвиток кореневої системи, що покращує здатність рослин поглинати воду з ґрунту.

5. **Реакція сортів гарбуза «Український багатоплідний» та «Волзький сірий».** Сорти гарбуза «Український багатоплідний» та «Волзький сірий» продемонстрували різну чутливість до дії фулерену C_{60} та водного дефіциту: «Український багатоплідний» виявив вищу адаптивну здатність, що проявлялася в стабільному покращенні морфометричних показників та активації антиоксидантного захисту (підвищення активності каталази) при стресі, тоді як «Волзький сірий» виявив меншу реактивність до фулерену на низьких концентраціях і був більш чутливим до високих концентрацій.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. GDM. General directorate of meteorology (2022). URL: <https://www.mgm.gov.tr/genel/meteoroloji.aspx> [date of access: 9.10.2022].
2. Fedoryshyna L. (2024). The problem of the influence of global climate change on the development of the agricultural production in Ukraine: historical excursion. *Scientific Papers of the Vinnytsia Mykhailo Kotsyiubynskyi State Pedagogical University Series History*, 50, 60-67. URL: <https://doi.org/10.31652/2411-2143-2024-50-60-67>.
3. Yadav, M., Jain, S., Tomar, R., Prasad, G. B. K. S. & Yadav, H. Medicinal and biological potential of pumpkin : an updated review *Nutrition Research Reviews Nutrition Research Reviews*. 184–190 (2017).
4. Prylutska S. V., Franskevych D. V., Yemets A. I. Cellular biological and molecular genetic effects of carbon nanomaterials in plants. *Cytology and genetics*. 2022. Vol. 56, no. 4. P. 351–360. URL: <https://doi.org/10.3103/s009545272204007/>.
5. Dhatt, A.S., Sharma, M., Kaur, B. (2020). Advances in Improvement of Pumpkin and Squashes. In: Gosal, S., Wani, S. (eds) *Accelerated Plant Breeding, Volume 2*. Springer, Cham. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-47298-6_11.
6. *International Journal of Pharmacognosy and Phytochemical Research* 2017; 9(9); 1190-1194. URL: <https://doi.org/10.25258/phyto.v9i09.10305>.
7. Adsul, S., Madkaikar, V. (2021). Pumpkin (*Cucurbita pepo*) Seed. In: Tanwar, B., Goyal, A. (eds) *Oilseeds: Health Attributes and Food Applications*. Springer, Singapore. URL: https://doi.org/10.1007/978-981-15-4194-0_19.
8. Gong, L., Paris, H.S., Nee, M.H. et al. Genetic relationships and evolution in *Cucurbita pepo* (pumpkin, squash, gourd) as revealed by simple sequence repeat polymorphisms. *Theor Appl Genet* 124, 875–891 (2012). URL: <https://doi.org/10.1007/s00122-011-1752-z>.
9. Колтунов В. Основи формування врожаю гарбуза / В. Колтунов, М. Булах, Д. Орлов // *Плантатор*. – 2016. – № 3. – С. 68-72.

10. Колтунов В. Структура врожаю гарбузів залежно від сорту / В. Колтунов, М. Булах, Д. Орлов // Плантатор. – 2016. – № 4. – С. 78-80.
11. Пазюк, В., Петрова, Ж., & Дуб, В. (2023). Економічні передумови до створення та техніко-економічне обґрунтування впровадження безвідходної технології переробки гарбуза. Таврійський науковий вісник. Серія: Економіка, (17), 73-79. URL: <https://doi.org/10.32782/2708-0366/2023.17.10>.
12. Aharoni, A., & Saito, K. (2012). High-Resolution Measurements in Plant Biology. *The Plant Journal*, 70(1), 157–176. URL: <https://doi.org/10.1111/j.1365-313X.2011.04876.x>.
13. Blankenship, R. E. (2021). *Molecular mechanisms of photosynthesis* (3rd ed.). Wiley-Blackwell. ISBN 978-1-119-80001-9.
14. Lichtenthaler, H. K., & Babani, F. (2022). Contents of photosynthetic pigments and ratios of chlorophyll a/b and chlorophylls to carotenoids $(a+b)/(x+c)$ in C_4 plants as compared to C_3 plants. *Photosynthetica*, 60(1), 3–9. URL: <https://doi.org/10.32615/ps.2021.041>.
15. . Lu Y., Yao J. Chloroplasts at the crossroad of photosynthesis, pathogen infection and plant defense. *International journal of molecular sciences*. 2018. Vol. 19, no. 12. P. 3900. URL: <https://doi.org/10.3390/ijms1912390>.
16. Kretschmer, M.; Damoo, D.; Djamei, A.; Kronstad, J. Chloroplasts and Plant Immunity: Where Are the Fungal Effectors? *Pathogens* 2020, 9, 19. URL: <https://doi.org/10.3390/pathogens9010019>.
17. Miller, G., Suzuki, N., Ciftci-Yilmaz, S., & Mittler, R. (2010). Reactive oxygen species: Multidimensional regulators of plant growth, development, and stress responses. *Plant Physiology*, 155(1), 1–8. <https://doi.org/10.1104/pp.110.170703>.
18. Zhang, H., Wang, X., & Zhang, J. (2021). Plant adaptation to low phosphorus availability: Core signaling networks and regulatory mechanisms. *Molecular Plant*, 14(6), 963–982. URL: <https://doi.org/10.1016/j.molp.2021.03.009>.

19. Liu, H., & Zhang, J. (2022). The role of reactive oxygen species in plant responses to drought stress. *Biochemical Journal*, 480(22), 1865–1882. URL: <https://doi.org/10.1042/BCJ20220056>.
20. Santos, L. M., Lima, J. S., & Souza, M. A. (2021). Fullerene C₆₀ derivatives as antimicrobial photodynamic agents. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 223, 112298. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2021.112298>.
21. Mikheev, I. V., Sozarukova, M. M., Izmailov, D. Y., Kareev, I. E., Proskurnina, E. V., & Proskurnin, M. A. (2021). Antioxidant potential of aqueous dispersions of fullerenes C₆₀, C₇₀, and Gd@C₈₂. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(11), 5838. URL: <https://doi.org/10.3390/ijms22115838>.
22. Santos, L. M., Lima, J. S., & Souza, M. A. (2021). Fullerene C₆₀ derivatives as antimicrobial photodynamic agents. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 223, 112298. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2021.112298>.
23. Ahmadi, S. Z., Zahedi, B., Ghorbanpour, M., & Mumivand, H. (2024). Comparative morpho-physiological and biochemical responses of *Capsicum annuum* L. plants to multi-walled carbon nanotubes, fullerene C₆₀, and graphene nanoplatelets exposure under water deficit stress. *BMC Plant Biology*, 24(116). URL: <https://doi.org/10.1186/s12870-024-04798-y>.
24. Proskurnina, E. V., Mikheev, I. V., Savinova, E. A., Ershova, E. S., Veiko, N. N., Kameneva, L. V., Dolgikh, O. A., Rodionov, I. V., Proskurnin, M. A., & Kostyuk, S. V. (2021). Effects of aqueous dispersions of C₆₀, C₇₀, and Gd@C₈₂ fullerenes on genes involved in oxidative stress and anti-inflammatory pathways. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(11), 6130. URL: <https://doi.org/10.3390/ijms22116130>.
25. Siringan, M. J., Dawar, A., & Zhang, J. (2023). Interactions between fullerene derivatives and biological systems. *Materials Chemistry Frontiers*, 7(11), 2153–2174. URL: <https://doi.org/10.1039/D3QM00004D>.

26. Mikheev, I. V., Sozarukova, M. M., Izmailov, D. Y., Kareev, I. E., Proskurnina, E. V., & Proskurnin, M. A. (2021). Antioxidant potential of aqueous dispersions of fullerenes C₆₀, C₇₀, and Gd@C₈₂. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(11), 6130. URL: <https://doi.org/10.3390/ijms22116130>.
27. Насіння гарбуза Український багатоплідний. Інтернет-магазин 7 Соток. URL: <https://7sotok.com.ua/ua/p356128502-semena-tykvy-ukrainskaya.html>.
28. Насіння гарбуза Український багатоплідний. Інтернет-магазин 7 Соток. URL: <https://7sotok.com.ua/ua/p356134141-semena-tykvy-seraya.html>.
29. Зубровська, О. М. (2021). Індукція захисних реакцій у рослин *Zea mays* L. (Poaceae) в умовах посухи. *Екологічні науки*, (6(39)), 182–186. URL: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2021.eco.6-39.31>.
30. Горяча, Л. М., & Журавель, І. О. (2016). Визначення кількісного вмісту хлорофілів у траві амброзії полинолистої. Кафедра хімії природних сполук Національного фармацевтичного університету, м. Харків.
31. Королюк, М. А., Іванова, Л. К., Майорова, І. Г., та Токарева, В. А. (1988). Метод визначення активності каталази. *Лабораторна робота*, (4), 44-47.
32. Horčinová Sedláčková, V., & Avagyan, A. (2022). Morphological characteristics of selected fruit parts and naked seeds of *Cucurbita pepo* var. *styriaca*. *Agrobiodiversity for Improving Nutrition, Health and Life Quality*, 6(2). URL: <https://agrobiodiversity.uniag.sk/scientificpapers/article/view/459>.