

Міністерство освіти і науки України  
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

інженерії машин, споруд та технологій

(повна назва факультету)

технічної механіки та сільськогосподарських машин

(повна назва кафедри)

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

Бакалавр

(назва освітнього ступеня)

на тему:

Удосконалення технології вирощування салатів на

гідропонній фермі з розробкою вертикального конвеєра

Виконав(ла): студент(ка) 4 курсу, групи МГз-41

спеціальності

208 Агроінженерія

(шифр і назва спеціальності)

Новий В.Д.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Керівник

Бабій А.В.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

Сташків М.Я.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри

Бабій А.В.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Рецензент

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Міністерство освіти і науки України  
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет інженерії машин, споруд та технологій  
(повна назва факультету)  
Кафедра технічної механіки та сільськогосподарських машин  
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Бабій А.В.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

« »

20\_\_ р.

**ЗАВДАННЯ  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

на здобуття освітнього ступеня **бакалавр**  
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю **208 Агроінженерія**  
(шифр і назва спеціальності)

студенту **Новому Володимирі Дмитровичу**  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи **Удосконалення технології вирощування салатів на гідропонній фермі з розробкою вертикального конвеєра**

Керівник роботи **Бабій Андрій Васильович, д.т.н., професор**  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «14» 04 2026 року № 4/9-182

2. Термін подання студентом завершеної роботи 17.06.2026

3. Вихідні дані до роботи: робоча гілка конвеєра довжиною 50 м по схилу; кут нахилу 61°; лоток 4000×400×150 мм; шар поживного розчину 50 мм; пінополістирольний плот XPS 3950×350×50 мм; середня маса товарної рослини 150 г; тривалість циклу 25 діб; крок переміщення 0,5 м; кількість кроків за добу 4.

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ. 1. Аналіз технологій вирощування салатів на гідропонних фермах.

2. Рекомендації з покращення технології вирощування салатів.

3. Проектна частина.

4. Безпека життєдіяльності, основи охорони праці.

Загальні висновки

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)



## Реферат

Кваліфікаційна робота бакалавра містить пояснювальну записку, таблиці, рисунки, формули, перелік посилань і додатки. Робота виконана відповідно до методичних вказівок до кваліфікаційної роботи для студентів першого рівня вищої освіти за освітньо-професійною програмою «Агроінженерія» спеціальності 208.

Об'єкт дослідження - технологічний процес вирощування листових салатів методом модифікованої DWC-гідропоніки у похилому конвеєрі. Предмет дослідження - конструктивні, технологічні, енергетичні та експлуатаційні параметри похилого гідропонного конвеєра з робочою гілкою 50 м по схилу, кутом нахилу  $61^\circ$  і лотком шириною 400 мм.

Мета роботи - розробити і обґрунтувати конструкцію похилого DWC-конвеєра для вирощування листових салатів із максимально можливим використанням природного освітлення у зимово-весняний період та зменшенням взаємного затінення між ярусами.

Методи дослідження: системний аналіз технологій вертикального землеробства, розрахунково-аналітичне визначення геометричних, продуктивнісних і силових параметрів, порівняльна оцінка технологічних режимів DWC, попередня світлотехнічна оцінка DLI, аналіз ризиків і техніко-економічне зіставлення варіантів.

Отримані результати: визначено геометрію конвеєра, кількість лотків, продуктивність одного конвеєра 25,2 кг/добу, потребу у 60 конвеєрах для цільового виробництва 1500 кг/добу, масу наповненого лотка 99,2 кг, базове тягове зусилля  $F_0$  близько 74 кН, розрахункове тягове зусилля 96-118 кН після введення коефіцієнта уточнення, момент на приводній зірочці 9,6-11,8 кН·м і попередньо прийняту встановлену потужність двигуна 0,37 кВт для дуже повільного крокового руху.

Ключові слова: гідропоніка, DWC, похилий конвеєр, агроінженерія, листовий салат, лоток, XPS, LED, DLI, привід, охорона праці.

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

Позначення	Зміст
DWC	Deep Water Culture, глибоководна гідропонна культура
NFT	Nutrient Film Technique, система тонкого шару поживного розчину
LED	світлодіодне джерело освітлення
DLI	Daily Light Integral, добова інтегральна кількість фотонів, моль/м <sup>2</sup> ·добу
ФАР	фотосинтетично активна радіація
EC	електропровідність поживного розчину, мСм/см
pH	водневий показник кислотності розчину
DO	концентрація розчиненого кисню, мг/л
XPS	екструдований пінополістирол
Lроб	довжина робочої гілки конвеєра, м
$\alpha$	кут нахилу конвеєра, град.
T	тривалість вегетаційного циклу, діб
t	крок між позиціями лотків, м
P1	добова продуктивність одного конвеєра, кг/добу
F	тягове зусилля ланцюга, Н

## ЗМІСТ

Реферат .....	3
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	4
ВСТУП.....	7
1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ ВИРОЩУВАННЯ САЛАТІВ НА ГІДРОПОННИХ ФЕРМАХ.....	9
1.1 Перспективи використання вертикальних ферм.....	9
1.2 Сучасний стан технологій вирощування салатів на гідропонних фермах .....	15
1.3 Аналіз конструкцій вертикальних гідропонних конвеєрів .....	16
1.4 Переваги, обмеження та ризики існуючих рішень .....	20
1.5 Мета, завдання та вихідні дані кваліфікаційної роботи.....	21
2 РЕКОМЕНДАЦІЇ З ПОКРАЩЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОЩУВАННЯ САЛАТІВ .....	25
2.1 Обґрунтування до комплектування технологічного обладнання.....	25
2.2. Вибір експлуатаційно-технологічних параметрів обладнання .....	29
2.3 Порівняння шару поживного розчину .....	33
2.4 Перевірка параметрів освітлення і DLI.....	37
2.5. Розрахунок техніко-економічних показників обладнання.....	41
3 ПРОЄКТНА ЧАСТИНА .....	43
3.1 Аналіз конструкцій машин-аналогів .....	43
3.2 Обґрунтування конструкції запропонованого конвеєра .....	49
3.3 Розрахунок параметрів робочого органу .....	53
3.4 Обґрунтування окремих параметрів лотків .....	56
3.5 Перевірка критичних ризиків конструкції.....	59
3.6 Регламент технічного обслуговування та ремонтпридатність .....	61
3.7 Організація виробничого процесу та операційна карта .....	62

	6
4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ .....	64
4.1. Моделювання небезпечних ситуацій .....	64
4.2 Вимоги до техніки безпеки при експлуатації технологічного обладнання .....	65
4.3 Вплив на довкілля .....	66
4.4 Заходи з охорони та раціонального використання ресурсів.....	67
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ .....	68
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ .....	70

## ВСТУП

Сучасне агропромислове виробництво працює в умовах зростання вартості енергії, дефіциту якісної землі, нестабільності клімату та високих вимог до стабільності постачання свіжої продукції. Для листових салатів особливо важливі короткий логістичний ланцюг, контроль санітарії, прогнозована якість і мінімізація втрат після збирання. У таких умовах гідропоніка та вертикальне землеробство є не декоративною модою, а технологічним напрямом, який дозволяє збільшити продуктивність одиниці площі, скоротити споживання води та керувати умовами росту рослин.

Класичні вертикальні ферми часто компенсують дефіцит природного освітлення штучними LED-системами. Це дає високу керованість процесу, але створює велику енергетичну статтю собівартості. У дипломній роботі розглянуто інший підхід: похилий конвеєр, орієнтований так, щоб у зимово-весняний період збільшити частку прямого природного сонячного потоку, який потрапляє на рослини. Основна ідея полягає не в повній відмові від LED, а в раціональному зменшенні його використання за рахунок геометрії конструкції.

Робота побудована навколо конкретного вузла - похилого гідропонного конвеєра DWC з лотками 4000×400×150 мм. У тексті поєднано технологічне обґрунтування вирощування салату, розрахунок робочого органу, попередню перевірку приводу, оцінку ризиків та заходи охорони праці.

Актуальність теми визначається потребою у технічно обґрунтованих рішеннях для інтенсивного виробництва зелені у регіонах з помірним кліматом. Похила схема може бути корисною для ферм, розміщених на схилах, у кар'єрах або в спеціально спроектованих тепличних спорудах. Водночас така схема має обмеження: велика маса води, високе тягове зусилля, складність обслуговування на висоті та потреба у точному контролі безпеки.

Мета роботи - розробити та обґрунтувати конструкцію похилого DWC-конвеєра для вирощування листових салатів з урахуванням вимог продуктивності, природного освітлення, механічної надійності та безпеки

праці.

Для досягнення мети поставлено такі завдання: проаналізувати технології гідропонного вирощування салатів; обґрунтувати вибір DWC-системи; вибрати параметри лотка, плота і шару поживного розчину; виконати розрахунок геометрії та продуктивності; оцінити освітлення і DLI; визначити навантаження на ланцюговий привід; розробити рекомендації з охорони праці, технічного обслуговування та пілотних випробувань.

Практичне значення роботи полягає у формуванні інженерної бази для подальшого пілотного виготовлення одного модуля конвеєра, перевірки режимів вирощування та уточнення економічної доцільності конструкції. Результати можуть використовуватися як вихідні матеріали для робочого проекту після виконання детальних розрахунків металоконструкції, валів, підшипників, фундаменту, вітрових навантажень і автоматизованої системи керування.

# 1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ ВИРОЩУВАННЯ САЛАТІВ НА ГІДРОПОННИХ ФЕРМАХ

## 1.1 Перспективи використання вертикальних ферм

Вертикальні ферми сьогодні розглядаються як один із найінноваційніших та найбільш перспективних напрямів розвитку аграрного виробництва, оскільки вони дозволяють суттєво підвищити ефективність використання ресурсів і значно збільшити обсяги вирощування продукції. За результатами досліджень науковців Стенфордського університету встановлено, що такі агротехнологічні системи здатні скорочувати споживання води майже на 95 % у порівнянні з традиційним землеробством. При цьому, на відносно невеликій площі, близько 6500 м<sup>2</sup>, вони забезпечують отримання врожаю, що у сотні разів перевищує продуктивність звичайних полів, зокрема до 390 разів більше.

Однією з ключових характеристик вертикальних ферм є можливість безперервного виробництва продукції протягом усього року. Завдяки застосуванню контрольованих умов вирощування – штучного освітлення, регульованої температури, вологості та живлення рослин – аграрний процес повністю відокремлюється від сезонних і кліматичних факторів. У результаті фермери отримують стабільний і прогнозований урожай незалежно від зовнішніх умов, що має особливе значення в періоди різких погодних змін.

Науковці підкреслюють, що вертикальне фермерство може стати важливим інструментом у вирішенні проблеми глобального голоду. Зважаючи на постійне зростання чисельності населення планети, питання забезпечення продовольством стає дедалі актуальнішим. За прогнозами міжнародних організацій, до середини XXI століття виробництво продуктів харчування потрібно суттєво збільшити, щоб задовольнити попит. У цьому контексті вертикальні ферми відкривають нові можливості, оскільки дозволяють отримувати значні обсяги продукції без розширення посівних площ.

Водночас сучасне сільське господарство стикається з серйозними

викликами. Активна урбанізація призводить до скорочення орних земель, які поступово забудовуються або використовуються під інші потреби. Крім того, відбувається зниження зацікавленості у фермерській діяльності, що спричиняє дефіцит робочої сили у галузі. Вертикальні ферми частково вирішують ці проблеми, оскільки можуть розміщуватися в межах міських територій, використовуючи промислові приміщення або спеціально збудовані багатоярусні комплекси.

Не менш важливим чинником є постійне зростання цін на продовольство, що спостерігається протягом останніх десятиліть. Подорожчання харчових продуктів створює соціальні ризики, особливо у країнах із низьким рівнем доходів населення. У минулому різкі стрибки цін уже призводили до суспільної нестабільності в різних регіонах світу. У довгостроковій перспективі впровадження високоефективних технологій, таких як вертикальне фермерство, може сприяти стабілізації продовольчих ринків.

Важливою перевагою вертикальних ферм є також раціональне використання природних ресурсів. Сучасні технології вирощування, зокрема гідропонні та аеропонні системи, дозволяють значно зменшити витрати води завдяки її повторному використанню. Крім того, поживні речовини надходять до рослин у точно дозованій кількості, що підвищує ефективність їх засвоєння та зменшує втрати. В умовах обмежених ресурсів це набуває особливої актуальності.

Ще однією суттєвою перевагою є зменшення потреби в застосуванні засобів захисту рослин. Вирощування у контрольованому середовищі знижує ризик появи шкідників і хвороб, що дає змогу мінімізувати використання пестицидів. Це, своєю чергою, позитивно впливає на екологічну безпеку продукції та довкілля.

Попри значні переваги, вертикальні ферми поки що не мають домінуючого впливу на глобальний ринок продовольства. Основними стримуючими факторами є висока вартість впровадження технологій, потреба у значних енергетичних ресурсах та складність технічного обслуговування.

Проте з розвитком інновацій, удосконаленням обладнання та зниженням витрат очікується, що ці системи стануть доступнішими та отримають ширше впровадження.

Вертикальні ферми формують новий підхід до ведення сільського господарства, поєднуючи інтенсивне виробництво з раціональним використанням ресурсів. У перспективі вони можуть стати ключовим елементом забезпечення населення продовольством, особливо в умовах глобальних викликів, пов'язаних зі зміною клімату, урбанізацією та зростанням населення.

Наведемо приклади вертикальних ферм, рис. 1.1.



Рисунок 1.1 – Класична вертикальна ферма



Рисунок 1.2 – Вертикальні ферми розробників Smart Oasis Farm

Бельгійський інноваційний стартап Urban Crops запропонував сучасну технологію вирощування рослин у закритих приміщеннях, яка базується на використанні автоматизованих вертикальних установок та спеціалізованого світлодіодного освітлення. У цій системі ключову роль відіграє так звана фіолетова підсвітка, що формується шляхом поєднання випромінювання червоного та синього спектрів. Саме ці діапазони світла є найбільш ефективними для процесу фотосинтезу, тому створюють оптимальні умови для росту і розвитку рослин незалежно від природного сонячного освітлення.

Застосування LED-технологій дозволяє точно регулювати інтенсивність та спектральний склад світла відповідно до потреб конкретних культур на різних етапах їх розвитку. Наприклад, синє світло стимулює формування листової маси, тоді як червоне сприяє процесам цвітіння та плодоношення. Таким чином, поєднання цих спектрів у вигляді фіолетового світіння є науково обґрунтованим рішенням, що забезпечує максимально ефективне використання енергії та прискорює біологічні процеси в рослинах.

Вирощування рослин у системах Urban Crops здійснюється не в традиційному ґрунті, а в спеціальному інертному субстраті. Такий матеріал характеризується значно нижчим вмістом мікроорганізмів, що дозволяє

створити більш контрольоване і майже стерильне середовище. Завдяки цьому істотно знижується ризик розвитку хвороб і шкідників, а отже, відпадає необхідність у застосуванні пестицидів та інших хімічних засобів захисту. Це робить продукцію більш екологічно чистою та безпечною для споживача.

Живлення рослин у подібних установках здійснюється за принципом гідропоніки, тобто всі необхідні поживні речовини надходять у вигляді розчину разом із водою. Такий підхід дозволяє максимально точно контролювати склад і дозування елементів живлення, що сприяє більш ефективному їх засвоєнню. Крім того, вода в системі циркулює повторно, що значно зменшує її витрати у порівнянні з традиційним землеробством.

Особливої уваги заслуговує ефективність використання площі у вертикальних фермах. За даними розробників, установка Urban Crops площею близько 50 м<sup>2</sup> здатна забезпечити врожайність, еквівалентну приблизно 500 м<sup>2</sup> відкритого ґрунту. Це досягається за рахунок багатоярусного розміщення рослин, що дозволяє максимально використовувати об'єм приміщення, а не лише його площу. У результаті значно підвищується щільність вирощування культур і, відповідно, загальна продуктивність.

Крім того, контрольовані умови вирощування забезпечують значне скорочення періоду вегетації. У середньому рослини в таких системах досягають у 2–3 рази швидше, ніж у відкритому ґрунті. Це пояснюється відсутністю стресових факторів, таких як перепади температури, нестача світла чи вологи, а також оптимізацією всіх умов росту. Завдяки цьому протягом року можна отримати кілька циклів урожаю, що додатково підвищує загальну ефективність виробництва.

Узагальнюючи наведені переваги, можна зробити висновок, що вертикальні ферми, зокрема технології Urban Crops, є у багато разів продуктивнішими за традиційні методи землеробства. Висока щільність розміщення рослин, швидке досягнення стиглості, економія води та відсутність потреби в агрохімікатах дозволяють говорити про зростання ефективності щонайменше у десять разів.

Таким чином, впровадження автоматизованих систем вирощування рослин із використанням світлодіодного освітлення відкриває нові можливості для розвитку сільського господарства. Подібні технології особливо актуальні в умовах урбанізації, обмеженості земельних ресурсів і необхідності забезпечення населення якісними продуктами харчування. У перспективі вони можуть стати важливим елементом аграрного виробництва майбутнього, орієнтованого на ефективність, екологічність і технологічність.



Рисунок 1.3 – Бельгійський стартап Urban Crops вертикальних ферм

## 1.2 Сучасний стан технологій вирощування салатів на гідропонних фермах

Листові салати належать до культур, які добре адаптуються до гідропонного вирощування завдяки короткому циклу, невеликій масі рослини, високій ринковій частці свіжої продукції та відносно невеликій глибині кореневої системи. У контрольованих умовах салати можуть вирощуватися в NFT, DWC, аеропонних і субстратних системах. Вибір конкретної системи залежить від вимог до продуктивності, доступності енергії, рівня автоматизації, санітарних вимог і вартості обладнання.

NFT-системи використовують тонкий шар поживного розчину, який постійно рухається по похилих жолобах. Їхня перевага - мала маса води і добра аерація коренів. Недоліком є залежність від безперервної роботи насосів: при зупинці циркуляції коренева зона швидко пересихає або перегрівається. Для стаціонарних горизонтальних теплиць NFT є технологічно зручним, але для рухомого похилого лотка така схема ускладнює живлення, герметизацію та аварійний режим.

DWC-система передбачає розміщення рослин у плаваючих плотах на поверхні поживного розчину. Основними перевагами є висока буферність, стабільність температури кореневої зони та більший час безпечної автономної роботи у разі короточасних відмов. Недолік - значна маса розчину, яка прямо впливає на металоконструкцію, ланцюги, привід і фундамент. У цій роботі DWC обрано саме як компроміс між технологічною стабільністю і механічним ускладненням.

Аеропоніка забезпечує дуже високий рівень аерації коренів і потенційно швидкий ріст, але є найчутливішою до відмов форсунок, фільтрів, насосів і системи керування. Для інженерної розробки похилого конвеєра аеропонна схема визнана надто ризиковою, тому вона розглядається лише як аналог, а не як базове рішення.

Для салату важливими контрольованими параметрами є рН, ЕС, температура розчину, концентрація розчиненого кисню DO, відносна вологість,

температура повітря, концентрація CO<sub>2</sub> та добова світлова доза DLI. Відхилення хоча б одного параметра не завжди миттєво зупиняє ріст, але системно знижує масу товарної рослини, рівномірність партії та термін зберігання після збирання.

У контексті агроінженерії головне завдання полягає не в простому виборі агротехнічного режиму, а в забезпеченні цього режиму конкретною машиною або технологічним обладнанням. Тому в роботі салат розглядається не лише як біологічний об'єкт, а як продукція, що проходить через механізований процес: посадка розсади, переміщення, живлення, освітлення, контроль, збирання, санітарне обслуговування та повторне використання лотка.

### **1.3 Аналіз конструкцій вертикальних гідропонних конвеєрів**

Вертикальні ферми на сучасному етапі розвитку аграрних технологій характеризуються значною різноманітністю конструктивних рішень, які відрізняються як за принципом організації простору, так і за способом переміщення рослин у процесі вирощування. У загальному вигляді такі системи можна умовно поділити на кілька основних типів: стелажні, ротаційні, конвеєрні (у тому числі горизонтальні) та ліфтові вертикальні конструкції. Кожен із цих варіантів має свої переваги, недоліки та сферу доцільного застосування, що визначається технологічними, економічними і конструктивними чинниками.

Найпростішими з конструктивного погляду є стелажні вертикальні ферми, які базуються на багатоярусному розміщенні рослин у нерухомих конструкціях. У таких системах рослини вирощуються на полицях або в контейнерах, які розташовуються одна над одною, що дозволяє максимально використовувати об'єм приміщення. Основною перевагою стелажних систем є простота реалізації, надійність конструкції та відносно невисока вартість їх

створення. Вони не потребують складних механізмів переміщення й можуть легко адаптуватися до різних типів культур.

Проте зі збільшенням кількості ярусів виникає суттєва проблема – нерівномірність освітлення. Нижні рівні практично повністю позбавляються доступу до природного світла, що змушує використовувати виключно штучне освітлення, зокрема LED-системи. Це, у свою чергу, призводить до значного підвищення енергоспоживання та експлуатаційних витрат. Таким чином, хоча стелажні ферми є технологічно простими, їх ефективність прямо залежить від якості систем освітлення і витрат на електроенергію.

Іншим типом є ротаційні вертикальні системи, у яких рослини розташовані на рухомих платформах або барабанах, що обертаються навколо центрального джерела світла. Така схема дозволяє забезпечити більш рівномірне освітлення всіх рослин, оскільки вони періодично змінюють своє положення відносно джерела світла. Це сприяє рівномірному росту культур і зменшенню енерговитрат.

Однак ротаційні системи мають низку конструктивних обмежень. По-перше, вони складніші у виготовленні та потребують надійних механізмів обертання. По-друге, зі збільшенням розмірів таких установок ускладнюється їх обслуговування, а також зростають навантаження на опорні елементи. Крім того, масштабування подібних систем є проблематичним, оскільки при великих розмірах забезпечити стабільну роботу обертових конструкцій стає складніше.

Особливе місце серед технологій займають конвеєрні системи, які широко застосовуються у тепличному господарстві. Найпоширенішим варіантом є горизонтальні конвеєри типу NFT (Nutrient Film Technique), у яких лотки з рослинами переміщуються по горизонтальній площині від зони висадки до зони збору врожаю. Перевагою такого підходу є безперервність виробничого процесу, що дозволяє оптимізувати організацію роботи та знизити витрати ручної праці.

Крім того, дана технологія добре вивчена і має значну практичну базу впровадження. Однак основним її недоліком є неефективне використання

простору. Горизонтальні конвеєри потребують значної площі підлоги, що обмежує можливість ущільнення виробництва. У випадках, коли стоїть завдання максимального використання вертикального об'єму приміщення або роботи на обмежених площах, така схема виявляється недостатньо ефективною.

З метою подолання цих обмежень було розроблено ліфтові вертикальні конвеєрні системи, у яких рослини переміщуються по замкненому контуру у вертикальній площині. Такі конструкції дозволяють значно підвищити щільність розміщення рослин, оскільки використовують не лише площу, а й висоту споруди. У процесі роботи лотки рухаються по вертикальному циклу, проходячи через різні зони – освітлення, живлення та обслуговування.

Попри очевидні переваги, ліфтові системи мають і певні недоліки. Основною проблемою є обмежене використання природного світла. При вертикальному розташуванні робочої гілки рослини отримують мінімальну кількість сонячної радіації, особливо в зимовий період, коли сонце знаходиться низько над горизонтом. У зв'язку з цим основне навантаження щодо забезпечення світлової енергії лягає на штучні джерела освітлення, що негативно впливає на енергоефективність.

Більш удосконаленим рішенням є похилі конвеєрні системи, прикладом яких є технологія Green Wave Organic. Головною особливістю таких установок є нахил робочої гілки конвеєра під певним кутом до горизонту (зокрема близько  $61^\circ$ ). Завдяки цьому площа розміщення рослин наближається до оптимальної орієнтації відносно положення сонця, що особливо важливо у зимово-весняний період.

Похиле розташування дозволяє значно покращити використання природного освітлення, оскільки рослини мають більший кут перехоплення сонячних променів. Це сприяє зменшенню потреби в штучному освітленні та підвищує загальну енергоефективність системи. Крім того, такий підхід забезпечує більш рівномірний розподіл світла між рослинами, що позитивно впливає на їх ріст та розвиток.

Разом з тим, впровадження похилих конвеєрів пов'язане з певними

технологічними складнощами. Зокрема, збільшується довжина ланцюгів і направляючих, що потребує більш точних розрахунків на міцність і жорсткість. Підвищуються вимоги до конструкції опорних елементів, оскільки зростають навантаження від маси рослин і робочих органів. Також важливим аспектом є забезпечення безпеки експлуатації, адже рухомі елементи розташовані під кутом і можуть створювати додаткові ризики.

Окрім цього, похилі системи потребують більш складної організації технічного обслуговування та автоматизації. Необхідно забезпечити синхронність руху лотків, стабільність швидкості, а також контроль параметрів вирощування на різних ділянках конвеєра. Це вимагає застосування сучасних систем керування, сенсорики та автоматизації.

Таблиця 1.1 – Порівняння технологічних схем для листових салатів

<b>Тип системи</b>	<b>Переваги</b>	<b>Обмеження для теми роботи</b>
Стелажна вертикальна ферма	Проста модульність, легке масштабування в приміщенні	Висока залежність від LED, затінення між ярусами
NFT-конвеєр	Мала маса води, добра аерація	Потреба у постійній циркуляції, складність рухомого живлення
DWC-басейни	Стабільність кореневої зони, буферність	Велика маса води, складність санітарії
Похилій DWC-конвеєр	Краще використання природного світла, потоковість	Велике тягове зусилля, складність рами і безпеки

Таким чином, аналіз різних типів вертикальних ферм показує, що кожна конструкція має свої особливості і сферу застосування. Стелажні системи

відзначаються простотою, але значною залежністю від штучного освітлення; ротаційні – забезпечують рівномірність світлового режиму, проте складні в реалізації; горизонтальні конвеєри є технологічно відпрацьованими, але потребують великих площ; ліфтові системи ефективно використовують висоту, але мають обмежене використання природного світла; похилі конвеєри, у свою чергу, поєднують переваги вертикального розміщення та кращого природного освітлення, хоча й вимагають більш складного конструктивного опрацювання.

У перспективі саме комбіновані та оптимізовані рішення, які враховують як технічні, так і біологічні аспекти вирощування рослин, можуть стати найбільш ефективними для впровадження у вертикальному фермерстві.

#### **1.4 Переваги, обмеження та ризики існуючих рішень**

Основна перевага вертикального землеробства полягає у підвищенні продуктивності одиниці площі. Однак площа сама по собі не є єдиним критерієм ефективності. Якщо система потребує надмірного освітлення, складного охолодження або частих санітарних зупинок, вигреш у площі може бути втрачений через операційні витрати. Тому в роботі оцінюється не лише щільність посадки, а повний технологічний компроміс.

Похилість конвеєра дозволяє зменшити взаємне затінення, але не ліквідує його повністю. Для ширини лотка 400 мм і кроку 0,5 м горизонтальна проєкція кроку становить приблизно 0,242 м. Геометричне перекриття у плані існує, однак при низькому куті зимово-весняного сонця та правильній орієнтації споруди частка прямого світла на робочій площині зростає.

Критичним обмеженням є маса поживного розчину. При шарі 50 мм у лотку 4000×400 мм об'єм води становить 0,08 м<sup>3</sup>, тобто близько 80 кг. Це

набагато більше, ніж маса корпусу, плота і рослин разом. Отже, вся механічна частина повинна проектуватися не «під салат», а під транспортування води на висоту понад 40 м.

Другий великий ризик - безпека обслуговування. Висота робочої гілки 43,7 м означає, що обладнання фактично належить до висотних технологічних конструкцій. Потрібні майданчики, огороження, аварійні стопи, захист від падіння предметів, блокування ланцюгів, уловлювачі та регламент доступу персоналу.

Третій ризик - санітарний. DWC має великий контакт води, коренів і полімерних поверхонь. XPS-плоти, кошики, клапани, переливи та внутрішні стінки лотків можуть накопичувати біоплівку. Це не причина відмовлятися від схеми, але причина закладати регламент миття, дезінфекції, періодичної заміни плотів і контролю мікробіологічних ризиків.

### **1.5 Мета, завдання та вихідні дані кваліфікаційної роботи**

Метою роботи є розроблення інженерно обґрунтованої конструкції похилого гідропонного конвеєра DWC для вирощування листових салатів. Мета відповідає рекомендованій тематиці кваліфікаційних робіт, де розроблена технологія вирощування салату в контрольованій DWC-системі, а розроблюваний вузол – похилий конвеєрний лотковий модуль.

Наведемо ключові конструктивні та технологічні параметри досліджуваної системи, яка застосовується для організації безперервного вирощування рослин у похилій багатоконтурній установці типу DWC (Deep Water Culture). Нижче подано її узагальнене текстове пояснення з розширеним аналітичним описом кожного параметра та його ролі у загальній кінематичній і технологічній схемі.

Базовим параметром є довжина робочої гілки, яка становить 50 метрів. Саме ця величина використовується як основа для проведення кінематичного розрахунку системи переміщення лотків із рослинами. Довжина робочої гілки визначає не лише геометричні розміри всієї установки, але й безпосередньо впливає на тривалість циклу вирощування, швидкість переміщення та загальну продуктивність системи. Чим більшою є довжина гілки, тим більша кількість позицій може бути розміщена вздовж неї, що, у свою чергу, дозволяє збільшити кількість рослин у виробничому процесі без зміни площі основи установки.

Кут нахилу робочої гілки прийнятий рівним  $61^\circ$ . Це значення не є випадковим – воно представляє компромісне рішення, яке враховує особливості природного освітлення в зимово-весняний період. За такого кута забезпечується оптимальне співвідношення між вертикальним розміщенням конструкції (що дозволяє економити площу) та ефективністю освітлення рослин. Менші кути призвели б до надмірного розтягнення конструкції по горизонталі, тоді як більші – могли б погіршити доступ світла до нижніх ярусів.

Від кута нахилу безпосередньо залежать геометричні характеристики установки. Зокрема, вертикальна висота конструкції становить 43,7 метра. Це значення визначається як добуток довжини робочої гілки на синус кута нахилу ( $H_v = L_{роб} \times \sin 61^\circ$ ). Значна вертикальна висота свідчить про компактність системи в горизонтальній площині та її придатність до використання в умовах обмежених площ, наприклад, у закритих тепличних комплексах або вертикальних фермах.

Горизонтальна проекція робочої гілки дорівнює 24,2 метра і визначається як добуток довжини гілки на косинус кута нахилу ( $B = L_{роб} \times \cos 61^\circ$ ). Цей параметр важливий для планування розміщення установки в приміщенні, оскільки визначає мінімальну необхідну площу для її монтажу. Співвідношення між вертикальною висотою і горизонтальною проекцією демонструє, що конструкція є досить високою, але відносно компактною за займаною площею.

Як робочий орган системи використовується лоток розміром  $4000 \times 400 \times 150$  мм. Саме в цих лотках розміщується поживний розчин та

коренева система рослин. Вибір таких габаритів обумовлений необхідністю забезпечення достатнього об'єму розчину, з одного боку, та мінімізації маси конструкції – з іншого. Довжина лотка дозволяє зручно інтегрувати його в транспортну систему, ширина визначає густоту посадки рослин, а висота – глибину шару поживного середовища.

Шар розчину в лотку прийнято рівним 50 мм. Це значення є компромісним і обрано з урахуванням двох протилежних факторів: буферної здатності системи та її маси. Збільшення товщини шару розчину покращує стабільність параметрів живлення (температури, концентрації поживних речовин), але водночас призводить до зростання маси рухомих елементів та енергетичних витрат на їх переміщення. Обраний рівень у 50 мм забезпечує достатній запас розчину для живлення рослин протягом циклу та одночасно не створює надмірного навантаження на механічну частину установки.

Тривалість повного циклу вирощування становить 25 діб. Це розрахункова величина, яка залежить від культури, умов вирощування та технології догляду. У даному випадку вона відповідає типовим показникам для швидкорослих зеленних культур. Тривалість циклу безпосередньо впливає на пропускну здатність системи та визначає необхідну швидкість переміщення лотків уздовж робочої гілки.

Крок переміщення лотків становить 0,5 метра, тобто саме на таку відстань система зміщується за одну операцію. Це значення визначає щільність розташування позицій уздовж гілки та, відповідно, кількість рослин, що одночасно перебувають у системі. При цьому крок вибраний таким чином, щоб забезпечити достатній простір для розвитку рослин і доступ світла до кожної одиниці продукції.

Щодобова кількість переміщень (кроків) становить 4, що відповідає загальному добовому ходу 2,0 метра ( $0,5 \text{ м} \times 4$ ). Такий режим руху дозволяє рівномірно переміщати лотки від початкової до кінцевої позиції протягом усього циклу вирощування. Рівномірність переміщення є критично важливою для забезпечення однакових умов росту для всіх рослин у системі.

Нарешті, розрахункова маса однієї рослини становить 150 грамів. Це товарний показник, який використовується для оцінки продуктивності системи. На основі цієї маси можна визначити загальний вихід продукції за цикл, враховуючи кількість позицій у системі. Цей параметр також враховується при розрахунках навантаження на конструкцію та привідні механізми.

Отримані дані можна звести до загальної таблиці, 1.2.

Таблиця 1.2 – Вихідні дані для проектування конвеєра

Параметр	Значення	Пояснення
Довжина робочої гілки $L_{роб}$	50 м	База кінематичного розрахунку
Кут нахилу $\alpha$	$61^\circ$	Компроміс для зимово-весняного освітлення
Вертикальна висота $H_v$	43,7 м	$H_v = L_{роб} \times \sin 61^\circ$
Горизонтальна проєкція $B$	24,2 м	$B = L_{роб} \times \cos 61^\circ$
Лоток	4000×400×150 мм	Робочий орган DWC
Шар розчину	50 мм	Прийнятий компроміс між буферністю і масою
Тривалість циклу $T$	25 діб	Розрахункова тривалість вирощування
Крок $t$	0,5 м	Відстань між позиціями
Кроків за добу $z$	4	Добовий хід 2,0 м
Маса рослини	150 г	Розрахункова товарна маса

Таким чином, усі наведені параметри є взаємопов'язаними і формують єдину систему, що забезпечує ефективне функціонування установки. Їх оптимальний підбір дозволяє досягти балансу між продуктивністю, енергоефективністю та конструктивною доцільністю, що є ключовим для розробки сучасних агротехнологічних рішень.

## 2 РЕКОМЕНДАЦІЙ ВИРОЩУВАННЯ САЛАТІВ 3 ПОКРАЩЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ

### 2.1 Обґрунтування до комплектування технологічного обладнання

Комплектування обладнання повинно забезпечити повний цикл: підготовку розсади, розміщення рослин у плотах, заповнення лотків, переміщення лотків по похилій гілці, підтримання поживного режиму, додаткове освітлення, злив розчину, збирання продукції, миття та повторне введення лотка у цикл. Якщо хоча б один елемент випадає, конвеєр перетворюється на складну раму без стабільної технології.

Базовий технологічний комплект включає: лотки з харчового поліпропілену, XPS-плоти з отворами під сітчасті кошики, два приводні ланцюги, шарнірні підвіси лотків, верхній приводний вал із зірочками, нижній натяжний вузол, частотний перетворювач, редуктор, електромагнітне гальмо, датчики положення, датчики рівня, резервуари поживного розчину, насосну групу, вузол коригування рН/ЕС і LED-панелі для компенсаційного освітлення.

Для агроінженерної роботи необхідними є: лоток, плот, система живлення, привід, гальмо, аварійний захист і контроль параметрів розчину. Бажаними, але такими, що можуть уточнюватися після пілотного проекту, є динамічне регулювання кута, повна автоматизація DLI, розширений моніторинг CO<sub>2</sub> і дистанційна аналітика.

Прийняте рішення: для роботи базовим вважається стаціонарний конвеєр з кутом 61°. Динамічна зміна кута розглядається як перспективна модернізація, але не закладається як обов'язкова, бо вона суттєво збільшує вартість, кількість рухомих вузлів і ризик відмови.

Таблиця 2.1 – Основні елементи технологічного комплексу

Елемент	Призначення	Вимога
Лоток DWC	Утримання розчину і плота	Герметичність, харчова придатність, жорсткість
XPS-плот	Носій рослин	Плавучість, санітарна обробка, контроль кришіння
Ланцюги	Переміщення лотків	Запас міцності, корозійна стійкість
Редуктор і двигун	Створення повільного руху	Високий момент, плавний пуск
Гальмо	Утримання навантаження	Fail-safe виконання
Датчики	Контроль положення і рівня	Захист від переливу та перекосу
LED-панелі	Додаткове освітлення	Керування за DLI і фотоперіодом

Поснемо більш розлого основні елементи технологічного комплексу.

Подана табл. 2.1 відображає сукупність основних конструктивних елементів технологічної системи гідропонного типу DWC, їх функціональне призначення та ключові технічні вимоги, що забезпечують надійність, безпечність і ефективність у процесі експлуатації. Для глибшого розуміння її змісту доцільно розглянути всі елементи як взаємопов'язану систему, у якій кожен компонент виконує чітко визначену роль і водночас впливає на роботу інших складових.

Центральним елементом системи є лоток типу DWC, який виконує функцію утримання поживного розчину та підтримки плаваючого носія рослин – плота. Його конструкція має забезпечувати повну герметичність, оскільки навіть незначні протікання можуть призводити до втрат розчину, порушення технологічного режиму та зниження ефективності вирощування. Окрім того, матеріал лотка повинен бути придатним для контакту з харчовими продуктами, адже у процесі вирощування відбувається безпосередній контакт поживного

середовища з кореневою системою рослин. Важливою є також достатня жорсткість конструкції, яка запобігає деформаціям під дією маси розчину та рослин, особливо при переміщенні лотків у межах установки.

Невід'ємним складником є XPS-плот, який виступає носієм рослин. Він забезпечує їх фіксацію та утримання у потрібному положенні над поверхнею розчину, при цьому коріння вільно занурюється в поживне середовище. Основною вимогою до плота є його плавучість – він має витримувати сумарне навантаження від рослин без втрати стабільності. Не менш важливою є можливість санітарної обробки, оскільки у вологому середовищі швидко розвиваються мікроорганізми, які можуть негативно впливати на рослини. Також необхідно контролювати процес кришіння матеріалу, адже частинки пінополістиролу можуть потрапляти у розчин і засмічувати систему або шкодити рослинам.

Для забезпечення безперервного та рівномірного переміщення лотків у системі використовуються ланцюги. Вони виконують функцію передачі тягового зусилля від приводу до робочих органів. У цьому випадку критично важливим є запас міцності, який дозволяє витримувати не лише статичні, але й динамічні навантаження, що виникають під час запуску, зупинки або можливих нерівномірностей руху. Оскільки система експлуатується у вологому середовищі, особливу увагу слід приділити корозійній стійкості матеріалів – це може бути досягнуто шляхом використання нержавіючих сталей або спеціальних антикорозійних покриттів.

Роботу ланцюгової системи забезпечує редуктор і електродвигун, які формують необхідний режим повільного та контрольованого руху лотків. Основною вимогою до цього вузла є забезпечення високого крутного моменту, що дозволяє переміщати значні маси без перевантаження двигуна. Важливо також забезпечити плавний пуск, щоб уникнути різких динамічних навантажень на механічні елементи системи, які можуть призвести до їх передчасного зношування або навіть аварійних ситуацій. Таким чином,

приводний механізм має бути не лише потужним, але й адаптованим до тривалої роботи в режимі низьких швидкостей.

Ключову роль у безпеці експлуатації виконує гальмівний механізм. Його призначення полягає в утриманні системи від самовільного руху, особливо в умовах відключення живлення або аварійної зупинки. Вимога виконання за принципом fail-safe означає, що гальмо автоматично спрацює при втраті енергії, забезпечуючи фіксацію положення лотків. Це особливо важливо для похилих або вертикальних систем, де під дією сили тяжіння можливе неконтрольоване переміщення, що створює ризик пошкодження обладнання або втрати урожаю.

Для забезпечення точності роботи та запобігання аварійним режимам у систему інтегровані датчики контролю. Вони виконують функції відстеження положення лотків, рівня розчину, а також можливих перекосів або відхилень у роботі механізмів. Завдяки цим елементам забезпечується автоматизований моніторинг стану системи, що дозволяє вчасно виявляти відхилення та реагувати на них. Зокрема, контроль рівня розчину запобігає переливу або недостатньому живленню рослин, а контроль положення дозволяє синхронізувати рух усіх елементів і уникати механічних пошкоджень.

Не менш важливим елементом є система додаткового освітлення, яка реалізується за допомогою LED-панелей. В умовах недостатнього природного освітлення, особливо в зимово-весняний період, вони забезпечують необхідний рівень світлової енергії для фотосинтезу. Вимогою до таких панелей є можливість керування за показниками DLI (Daily Light Integral) та фотоперіоду, що дозволяє оптимізувати режим освітлення відповідно до потреб конкретної культури. Це сприяє підвищенню врожайності, покращенню якості продукції та зниженню енергетичних витрат.

Узагальнюючи, можна зазначити, що всі розглянуті елементи утворюють єдину інтегровану систему, де кожен компонент виконує як власну функцію, так і підтримує загальну стабільність процесу вирощування. Висунуті до них вимоги відображають не лише конструктивні особливості, але й специфіку

агротехнологічного середовища, яке характеризується підвищеною вологістю, необхідністю дотримання санітарних норм і забезпечення безперервності виробничого процесу. Саме комплексний підхід до проектування та узгодження характеристик усіх компонентів дозволяє досягти високої ефективності та надійності функціонування системи.

## **2.2. Вибір експлуатаційно-технологічних параметрів обладнання**

Основним технологічним параметром DWC є стабільність кореневої зони. Для салату приймається рН 5,8-6,2, ЕС 1,2-1,8 мСм/см, температура розчину 18-20°C, DO не нижче 6 мг/л. Ці значення є технологічно важливими, оскільки при перегріві розчину зменшується розчинність кисню, при надмірній ЕС рослина переходить у стрес, а при неправильному рН частина елементів живлення стає менш доступною.

Для повітряного середовища приймається денна температура 18-22°C, нічна 15-18°C, відносна вологість 65-75%. У реальній теплиці ці показники залежать від вентиляції, теплової інерції води, сонячного навантаження і щільності рослин.

Крок переміщення 0,5 м обрано для узгодження механіки і біології циклу. При 4 кроках на добу лоток проходить 2 м за добу. За 25 діб він проходить 50 м робочої гілки. Це означає, що кінематика конвеєра безпосередньо прив'язана до тривалості вирощування. Якщо фактичний цикл стане 30 діб, потрібно або змінити добовий хід, або довжину гілки, або прийняти іншу логіку збирання.

Ширина лотка 400 мм є одним з ключових параметрів. Вона зменшує затінення і масу порівняно з лотками 800-1000 мм, але водночас обмежує кількість рослин на одному лотку. Для плота 3950×350 мм приймається

дворядне розміщення з 42 рослинами. Це не максимальна біологічна щільність, а конструктивно-технологічний компроміс для похилого конвеєра.

Таблиця 2.2 – Рекомендовані експлуатаційні параметри

Параметр	Рекомендоване значення	Контроль
pH	5,8–6,2	pH-датчик ручна/автоматична корекція
ЕС	1,2–1,8 мСм/см	ЕС-датчик, дозування А/В
Температура розчину	18–20°C	Термодатчик, теплообмін
DO	≥ 6 мг/л	Аерація, контроль кисню
Рівень розчину	50 ± 5 мм	Датчик рівня, перелив
Фотоперіод	до 16 год	LED за графіком і DLI
Вологість повітря	65–75%	Вентиляція, осушення за потреби

Наведена сукупність параметрів відображає оптимальні технологічні умови функціонування гідропонної системи типу DWC та водночас визначає вимоги до систем контролю, які забезпечують стабільність ростових процесів рослин. Кожен із параметрів виконує критично важливу роль у формуванні збалансованого середовища, а їх взаємозв'язок формує цілісну систему керування мікрокліматом і живленням.

Одним із базових показників є кислотність поживного розчину, яка визначається значенням pH у межах 5,8–6,2. Саме цей інтервал вважається оптимальним для більшості зеленних культур, оскільки забезпечує максимальну доступність макро- та мікроелементів для кореневої системи.

Відхилення від цього діапазону може призводити до блокування окремих елементів живлення або, навпаки, до їх надлишкового засвоєння, що негативно впливає на розвиток рослин. Для забезпечення стабільності показника використовуються рН-датчики, які дозволяють здійснювати безперервний моніторинг, а також системи ручної або автоматичної корекції, що додають відповідні реагенти для нормалізації кислотності.

Не менш важливим параметром є електропровідність розчину (ЕС), яка повинна знаходитися в межах 1,2–1,8 мСм/см. Цей показник відображає загальну концентрацію розчинених солей і, відповідно, рівень мінерального живлення рослин. Низькі значення ЕС свідчать про недостатню кількість поживних речовин, тоді як надмірно високі можуть викликати осмотичний стрес та пригнічення кореневої системи. Контроль електропровідності здійснюється за допомогою спеціалізованих датчиків, які інтегруються в систему керування, а регулювання – шляхом дозування компонентів живильного розчину типу А/В, що дозволяє точно підтримувати необхідний баланс елементів.

Температура поживного розчину є ще одним критичним фактором і повинна підтримуватися в межах 18–20°C. Саме цей температурний діапазон забезпечує оптимальні умови для поглинання поживних речовин та активності кореневої системи. Зниження температури уповільнює метаболічні процеси, тоді як підвищення може призводити до зменшення розчиненого кисню та розвитку патогенних мікроорганізмів. Контроль температури здійснюється за допомогою термодатчиків, а її стабілізація – через теплообмінні системи, які можуть включати як охолодження, так і підігрів залежно від умов експлуатації.

Особливу увагу в системах DWC приділяють вмісту розчиненого кисню (DO), який повинен бути не нижчим за 6 мг/л. Оскільки коренева система рослин постійно перебуває у водному середовищі, наявність достатньої кількості кисню є критичною для її дихання. Недостатній рівень DO може спричинити гіпоксію, що призводить до пригнічення росту або навіть загибелі рослин. Для підтримання необхідного рівня кисню застосовуються системи

аерації, які насичують розчин повітрям або чистим киснем, а також датчики контролю, що дозволяють оперативно реагувати на зміни.

Рівень поживного розчину у лотках підтримується на рівні  $50 \pm 5$  мм. Така точність є необхідною для забезпечення стабільного контакту кореневої системи з розчином та водночас запобігання переливам або оголенню коренів. Контроль рівня здійснюється за допомогою датчиків, які фіксують фактичну висоту шару рідини та подають сигнали на системи регулювання. Додатково можуть використовуватися переливні механізми, що забезпечують захист від аварійного підвищення рівня.

Світловий режим рослин визначається фотоперіодом, який може сягати до 16 годин на добу. Така тривалість освітлення дозволяє максимізувати фотосинтетичну активність і пришвидшити ріст рослин, особливо в умовах обмеженого природного світла. Контроль цього параметра здійснюється за допомогою LED-панелей, які працюють за заданим графіком і можуть адаптуватися відповідно до показника DLI (інтегральної добової дози світла). Такий підхід дозволяє не лише забезпечити оптимальні умови для росту, але й оптимізувати енергоспоживання.

Вологість повітря в зоні вирощування підтримується в межах 65–75%. Цей параметр має суттєвий вплив на транспірацію рослин, інтенсивність обміну речовин та загальний стан культури. Надмірна вологість може сприяти розвитку грибкових захворювань, тоді як занадто низька – призводить до надмірного випаровування води та стресу рослин. Для регулювання вологості застосовуються системи вентиляції, які забезпечують обмін повітря, а за потреби – осушувачі або зволожувачі, що дозволяють підтримувати параметри у заданих межах.

Узагальнюючи, можна зазначити, що всі розглянуті параметри формують багаторівневу систему керування, у якій кожен показник підлягає постійному моніторингу та регулюванню. Їх значення обрані таким чином, щоб забезпечити максимально сприятливе середовище для росту рослин, з урахуванням фізіологічних потреб та технологічних обмежень. Водночас

система контролю, побудована на основі відповідних датчиків і виконавчих механізмів, відіграє ключову роль у підтриманні стабільності цих параметрів. Саме комплексне поєднання оптимальних значень і ефективних засобів контролю дозволяє досягти високої продуктивності, якості продукції та надійності функціонування гідропонної установки.

### 2.3 Порівняння шару поживного розчину

Шар поживного розчину 50 мм є технічно обґрунтованим, але можливі і інші параметри: 30, 40 і 50 мм. Метою порівняння є не абсолютний доказ, а вибір робочого компромісу для пілотної конструкції.

Шар 30 мм дає меншу масу розчину:  $4,0 \times 0,40 \times 0,03 = 0,048 \text{ м}^3$ , тобто близько 48 кг води на лоток. Це зменшує тягове зусилля і вимоги до рами. Але такий шар має меншу буферну ємність, швидше змінює температуру, ЕС і рН, а також має менший запас при похибках рівня та коливаннях лотка.

Шар 40 мм збільшує масу до 64 кг і може бути проміжним рішенням. Його варто перевірити на пілоті, бо він зменшує навантаження порівняно з 50 мм, але має кращу стабільність, ніж 30 мм. Якщо пілотні випробування покажуть достатній DO і рівномірний розвиток коренів, 40 мм може виявитися економічно сильнішим варіантом.

Шар 50 мм дає 80 кг води на лоток. Це найважчий із розглянутих варіантів, але він забезпечує найвищу буферність серед трьох сценаріїв. Для проєкту він приймається як безпечний технологічний варіант, який зменшує ризик різких коливань у кореневій зоні. Остаточне рішення після пілоту повинно прийматися за показниками маси рослини, DO, температури, витрат енергії та механічного ресурсу.

Таблиця 2.3 – Порівняння можливих шарів поживного розчину

Шар розчину	Об'єм лоток на	Маса води	Перевага	Недолік
30 мм	0,048 м <sup>3</sup>	48 кг	Менше навантаження	Нижча буферність
40 мм	0,064 м <sup>3</sup>	64 кг	Компроміс маси і стабільності	Потребує пілотної перевірки
50 мм	0,080 м <sup>3</sup>	80 кг	Найкраща буферність у порівнянні	Найбільше тягове навантаження

У наведеній таблиці 2.3 розглянуто один із ключових конструктивно-технологічних параметрів гідропонної системи – товщину шару поживного розчину в лотку, а також пов'язані з нею показники: об'єм рідини, масу води та експлуатаційні переваги й недоліки. Детальний аналіз цих варіантів дозволяє обґрунтувати вибір оптимального режиму функціонування системи з урахуванням як агротехнічних, так і механічних факторів.

Першим варіантом є шар розчину товщиною 30 мм. За таких умов об'єм рідини в одному лотку становить 0,048 м<sup>3</sup>, що еквівалентно масі приблизно 48 кг води. Основною перевагою такого рішення є зменшення загального навантаження на конструктивні елементи системи, зокрема на ланцюговий механізм, привід та несучі конструкції. Менша маса безпосередньо впливає на зниження енергоспоживання, спрощення механіки переміщення та підвищення довговічності обладнання. У системах із безперервним рухом це має особливо важливе значення, оскільки зменшує динамічні навантаження під час запуску та зупинки.

Водночас така мала товщина шару має суттєвий недолік – нижчу буферність поживного середовища. Буферність у цьому контексті означає здатність розчину підтримувати стабільні фізико-хімічні параметри, такі як температура, концентрація поживних речовин (ЕС) та кислотність (рН). За

меншого об'єму води будь-які зміни цих параметрів відбуваються швидше, що може призводити до стресу рослин і потребує більш інтенсивного контролю. Крім того, при коливаннях рівня або частковому випаровуванні коренева система може частково оголюватися, що є небажаним для стабільного росту.

Другий варіант передбачає використання шару розчину товщиною 40 мм. У цьому випадку об'єм води в лотку збільшується до 0,064 м<sup>3</sup>, а її маса становить близько 64 кг. Цей варіант розглядається як компроміс між двома крайніми рішеннями – мінімальним і максимальним шаром. З одного боку, він забезпечує суттєво кращу буферність у порівнянні з 30-мм шаром, тобто підвищує стабільність температурного режиму та концентрації поживних речовин. З іншого боку, маса системи залишається помірною і не створює надмірного навантаження на механічні компоненти.

Саме тому такий варіант часто розглядається як базовий для проектування, однак він має один важливий недолік – необхідність пілотної перевірки. Це пояснюється тим, що навіть незначні зміни у товщині шару можуть по-різному проявлятися залежно від конкретної культури, умов вирощування, конфігурації системи та режимів її експлуатації. Наприклад, у реальних умовах може з'ясуватися, що рівень аерації є недостатнім або навпаки надмірним, або ж що змінюється швидкість теплових процесів у розчині. Тому 40 мм – це раціональний, але експериментально підтверджуваний вибір.

Третій варіант – шар товщиною 50 мм – характеризується найбільшим об'ємом розчину, який становить 0,080 м<sup>3</sup> при масі води близько 80 кг. Основною його перевагою є найкраща буферність серед розглянутих варіантів. Завдяки більшому об'єму рідини система стає значно інерційнішою до зовнішніх впливів: зміни температури, коливання концентрації добрив або додавання води мають менш різкий ефект. Це створює більш стабільні умови для росту рослин, що особливо важливо при інтенсивному виробництві та мінімізації ризиків.

Крім того, більший шар розчину забезпечує кращий контакт кореневої системи з поживним середовищем і зменшує ризик її часткового оголення. Це

позитивно впливає на розвиток рослин, їхню рівномірність і кінцеву товарну якість. У системах, де пріоритетом є саме стабільність і висока якість продукції, цей варіант може бути найбільш доцільним.

Однак основним недоліком 50-мм шару є значне збільшення тягового навантаження на привідні механізми. Збільшення маси кожного лотка означає, що двигун і редуктор повинні розвивати більший крутний момент, а всі механічні елементи працюють в умовах підвищеного навантаження. Це може призводити до збільшення енергоспоживання, необхідності використання більш потужного обладнання та, відповідно, до зростання вартості системи. Також зростає навантаження на ланцюги, опорні вузли та конструктивні елементи, що може впливати на їхній ресурс.

Таким чином, вибір оптимальної товщини шару розчину є багатокритеріальним завданням, що вимагає врахування як біологічних потреб рослин, так і механічних можливостей системи. Менший шар (30 мм) є вигідним з точки зору енергоефективності та навантажень, але поступається за стабільністю середовища. Середній варіант (40 мм) забезпечує баланс між цими факторами, хоча потребує експериментального підтвердження. Найбільший шар (50 мм) гарантує найкращі умови для росту рослин, проте супроводжується підвищеними вимогами до конструкції та приводу.

У загальному підсумку, остаточний вибір має базуватися на пріоритетах конкретного проєкту: якщо ключовим є зниження енергоспоживання і вартості – доцільно орієнтуватися на менші значення; якщо ж основною метою є стабільність та висока якість продукції – перевагу слід надавати більшому шару розчину. Оптимальне рішення найчастіше знаходиться у компромісній зоні, що підтверджується як теоретичними розрахунками, так і практикою впровадження подібних систем.

## 2.4 Перевірка параметрів освітлення і DLI

Кут  $61^\circ$  обґрунтовується через геометрію падіння сонячних променів у зимово-весняний період для широти близько  $50^\circ$  пн. ш. У грудні полуденне сонце має дуже низьке положення, тому оптимальна площина була б крутішою. У лютому і березні кут сонця зростає, і площина під  $61^\circ$  стає ближчою до перпендикулярної до сонячних променів. Це робить кут  $61^\circ$  не універсальним максимумом на весь рік, а компромісом для важливого періоду вирощування.

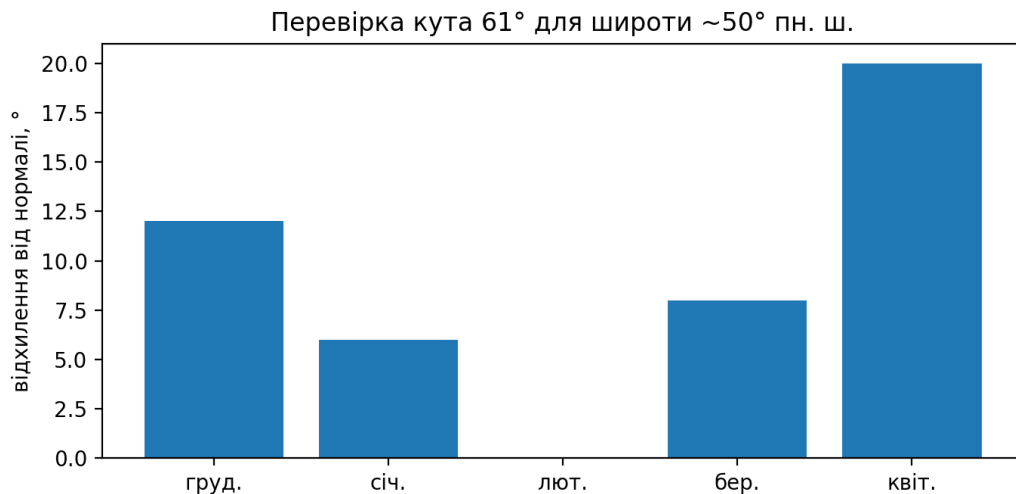


Рисунок 2.1 – Схема сонячного освітлення похилого конвеєра

DLI – добова інтегральна кількість фотонів є більш коректним показником, ніж одноразове значення освітленості. Рослина реагує не лише на піковий сонячний потік, а на суму світла за день.

Для попередньої оцінки приймається проста модель: корисний потік на площину конвеєра пропорційний  $\cos \theta$ , де  $\theta$  – кут між нормаллю до площини і напрямом сонячних променів. Така модель не враховує дифузне світло, хмарність, втрати в полікарбонаті та відбиття, але дозволяє порівняти кути  $55^\circ$ ,  $61^\circ$ ,  $70^\circ$  і  $75^\circ$  між собою.

Висновок за освітленням: кут  $61^\circ$  достатньо раціональний для лютого-березня, але в грудні він не є оптимальним. Тому для грудня та похмурих днів

потрібно або LED-досвічування, або динамічна система кута, або прийняття нижчої продуктивності. У роботі базовим рішенням є LED-компенсація, бо вона простіша і надійніша за поворот усієї конструкції.

Таблиця 2.4 - Попередня оцінка сезонної відповідності кута нахилу

<b>Місяць</b>	<b>Орієнтовний кут сонця опівдні</b>	<b>Оптимальний нахил площини</b>	<b>Коментар</b>
Грудень	16–17°	73–74°	61° потребує LED-компенсації
Лютий	близько 27°	близько 63°	61° близький до оптимального
Березень	близько 37°	близько 53°	61° ще прийнятний, але не максимум
Квітень	понад 45°	менше 45°	зростає ризик перегріву і потреба у затіненні

Тут відображено сезонну зміну геометричних умов природного освітлення та відповідні рекомендації щодо оптимального кута нахилу робочої площини в гідропонній системі. Ці параметри безпосередньо пов'язані з висотою Сонця над горизонтом у різні місяці року та мають суттєвий вплив на ефективність використання світлової енергії рослинами. Аналіз цих залежностей дозволяє оцінити, наскільки обраний конструктивний кут нахилу (у даному випадку 61°) відповідає оптимальним умовам у різні періоди року, а також визначити необхідність застосування додаткових технологічних рішень.

У зимовий період, зокрема в грудні, Сонце перебуває на найнижчій висоті над горизонтом – приблизно 16–17° опівдні. За таких умов оптимальний кут нахилу площини для максимального перехоплення сонячного випромінювання

становить близько  $73\text{--}74^\circ$ . Це пояснюється тим, що площина повинна бути максимально перпендикулярною до напрямку падіння сонячних променів, щоб ефективно використовувати навіть обмежений світловий ресурс. Порівняно з цими значеннями, фактично прийнятий кут  $61^\circ$  є меншим, що призводить до недоотримання частини сонячної енергії. Саме тому в цей період виникає потреба у компенсації за рахунок штучного освітлення, зокрема LED-панелей. Таким чином, у грудні природне освітлення не може забезпечити повноцінний фотосинтез, і система повинна працювати в режимі комбінованого світлозабезпечення.

У лютому ситуація суттєво покращується: висота Сонця опівдні зростає приблизно до  $27^\circ$ . Відповідно, оптимальний кут нахилу площини зменшується до приблизно  $63^\circ$ . У цьому випадку конструктивно прийняте значення  $61^\circ$  практично співпадає з оптимальним, що означає максимально ефективне використання природного світла. Це один із найбільш сприятливих періодів для роботи системи, оскільки потреба у додатковому освітленні зменшується, а енергоефективність зростає. Фактично, у цей час система працює у режимі, близькому до оптимального балансу між природним та штучним освітленням.

У березні Сонце піднімається ще вище – до приблизно  $37^\circ$  опівдні. Оптимальний кут нахилу в цей період вже становить близько  $53^\circ$ , тобто є значно меншим за прийнятий  $61^\circ$ . Це означає, що площина починає бути «перенахиленою» відносно оптимального положення, і частина сонячного випромінювання не використовується максимально ефективно. Проте різниця ще не є критичною, тому можна вважати, що кут  $61^\circ$  залишається прийнятним. У цей період система все ще працює достатньо ефективно, хоча вже спостерігається певне зниження коефіцієнта використання природного світла порівняно з лютим. Водночас підвищення загальної інтенсивності сонячної радіації частково компенсує цей ефект.

З настанням квітня ситуація змінюється ще більш помітно. Висота Сонця опівдні перевищує  $45^\circ$ , а оптимальний кут нахилу площини стає меншим за  $45^\circ$ . У цих умовах фіксований кут  $61^\circ$  вже суттєво відрізняється від оптимального,

що призводить до зменшення ефективності перехоплення прямого сонячного випромінювання. Більше того, зростає ризик перегріву поверхонь та самих рослин, особливо у верхніх ярусах системи. Інтенсивне сонячне випромінювання може спричиняти надмірне нагрівання поживного розчину, що негативно впливає на кореневу систему та знижує рівень розчиненого кисню.

У зв'язку з цим у квітні та наступних місяцях особливо актуальними стають заходи щодо регулювання мікроклімату, зокрема застосування систем затінення, вентиляції та охолодження. Затінення дозволяє зменшити надлишковий тепловий і світловий потік, запобігаючи стресу рослин. Таким чином, якщо у зимовий період основною проблемою є дефіцит світла, то навесні акцент зміщується на боротьбу з його надлишком та пов'язаними негативними наслідками.

Узагальнюючи аналіз, можна зробити висновок, що фіксований кут нахилу  $61^\circ$  є компромісним рішенням, яке найбільш ефективно працює у перехідний зимово-весняний період, зокрема у лютому. У грудні він недостатній з точки зору перехоплення світла, що потребує компенсації штучним освітленням, тоді як у березні та особливо квітні він стає надлишковим і потребує додаткових заходів регулювання теплового режиму. Такий підхід є типовим для інженерних систем, де замість складних механізмів зміни кута нахилу обирається стаціонарна конструкція з додатковими засобами адаптації – освітленням і затіненням.

Отже, наведені в таблиці дані не лише характеризують сезонну динаміку сонячного освітлення, але й демонструють необхідність системного підходу до проектування гідропонних установок. Ефективність їх роботи визначається не одним параметром, а поєднанням геометрії, світлотехніки та мікрокліматичного контролю, які разом забезпечують стабільні умови для вирощування рослин протягом усього року.

## 2.5. Розрахунок техніко-економічних показників обладнання

Техніко-економічний розрахунок має попередній характер, бо повна собівартість залежить від ціни металу, вартості приводу, типу покриття, тарифу на електроенергію, ціни реалізації салату, заробітної плати, втрат продукції та санітарних простоїв.

Основні витрати поділяються на капітальні та експлуатаційні. До капітальних належать рама, ланцюги, лотки, привід, редуктор, гальмо, резервуари, насосна група, датчики, електрика, LED-панелі, монтаж і система безпеки. До експлуатаційних належать електроенергія, поживні солі, вода, розсада, оплата праці, миття, заміна XPS-плотів, ремонт ланцюгів і простої.

Найчутливіші економічні фактори: фактична маса товарної рослини, частка браку, ціна реалізації, LED-енергія на 1 кг продукції та ресурс рухомих вузлів. Якщо маса рослини падає з 150 г до 120 г, продуктивність одного лотка зменшується з 6,3 кг до 5,04 кг. Це автоматично знижує продуктивність конвеєра на 20%, хоча механічні витрати залишаються майже такими самими.

Попередня формула питомої енергії LED:

$$E_{кг} = E_{LED} / M_{доб}, \quad (2.1)$$

де  $E_{LED}$  – добове споживання досвічування, кВт·год/добу,

$M_{доб}$  – добова маса продукції, кг/добу.

Для точного значення потрібно знати потужність панелей і тривалість роботи за DLI. У роботі приймається, що LED використовується як компенсаційна система, а не як єдине джерело світла.

Таблиця 2.5 -- Базові техніко-економічні показники продуктивності

Показник	Розрахункова база	Значення
Продуктивність 1 лотка	42×0,150 кг	6,3 кг
Лотків до збирання за добу	100/25	4 шт./добу
Продуктивність конвеєра 1	4×6,3	25,2 кг/добу
Кількість конвеєрів для 1500 кг/добу	1500/25,2	≈60 шт.
Фактична продуктивність ферми	60×25,2	1512 кг/добу
Річна продуктивність	1512×365	551 880 кг/рік

Основні результати техніко-економічних показників продуктивності наведено у табл. 2.5.

## 3 ПРОЄКТНА ЧАСТИНА

### 3.1 Аналіз конструкцій машин-аналогів

Досліджуваний конвеєр доцільно розглядати як транспортний механізм (машину) безперервно-порційної дії, призначену для переміщення технологічних ємностей із поживним розчином та рослинами по замкненому контуру. Такий підхід є обґрунтованим, оскільки в даній системі транспортна функція безпосередньо пов'язана з агротехнологічним процесом: конвеєр не просто переміщує вантаж, а забезпечує зміну положення рослин у просторі, підтримання режиму освітлення, доступу до поживного середовища та реалізацію циклічної схеми вирощування.

За своєю суттю подібна машина належить до класу конвеєрних систем, у яких робочий орган рухається по замкненому контуру, а вантаж переміщується порціями з безперервним характером роботи механізму. Саме тому найближчими конструктивними аналогами можна вважати елеваторні, ланцюгові, скребкові та підвісні конвеєри, а також окремі транспортні системи похилого типу. Проте у розглянутій гідропонній установці вантаж має специфічний характер: це не сипучий матеріал, не штучні вантажі і не тарно-штучна продукція, а лоток із водою, поживним розчином і живими рослинами, тобто об'єкт, чутливий до вібрацій, ударних навантажень, перекосів і коливань рівня рідини.

Саме ця особливість суттєво відрізняє гідропонний конвеєр від більшості класичних транспортних машин. Якщо у зернових елеваторах, скребкових або ланцюгових транспортерах основним критерієм є переміщення маси без втрат продуктивності, то у даному випадку на перший план виходить збереження технологічної стабільності вантажу. Для рослин важливо не лише доставити їх у потрібну точку, а й зробити це так, щоб не виникало хвиль у розчині,

переливів, порушення горизонтальності лотка, пошкодження кореневої системи або стресу для рослин від надмірної динаміки руху.

Найближчим за принципом побудови до розглянутого механізму є елеватор. У класичному елеваторі транспортними елементами виступають ковші, які закріплені на стрічці або ланцюгу та рухаються по замкненому контуру з обводом зірочок або барабанів. Такі машини призначені для підйому зерна, насіння, кормів, гранульованих або дрібнокускових матеріалів. Їхня робота базується на безперервному переміщенні вантажу з нижньої точки в верхню, а далі – на розвантаженні під дією сили тяжіння або відцентрових сил.

Проте у гідропонній установці такий принцип може бути використаний лише частково. Якщо в елеваторі ківш може змінювати орієнтацію під час проходження зірочок, то в нашому випадку лоток повинен залишатися горизонтальним на робочій гілці, інакше поживний розчин почне переливатися через борти, а коренева система отримає нерівномірне зволоження. Отже, звичайна кінематика елеватора тут недостатня. Потрібні шарнірні кронштейни, підвісні вузли або маятникові опори, які компенсуватимуть зміну нахилу рами під час руху по траєкторії.

Це означає, що в конструкції гідропонного конвеєра необхідно поєднати риси елеватора та підвісної транспортної системи. Робоча гілка може бути нахиленою, однак сам лоток повинен мати власну систему самовирівнювання. Саме ця вимога визначає специфіку проектування: транспортний механізм має не тільки переміщати вантаж, а й підтримувати його стабільне орієнтування в просторі.



Рисунок 3.1 – Схема елеваторної машини

Іншим близьким аналогом є ланцюговий конвеєр, у якому тяговим органом виступає один або кілька ланцюгів, а вантаж переміщується по жолобу, настилу або на спеціальних опорах. Такі машини широко застосовуються в сільському господарстві для транспортування кормів, добрив, коренеплодів, а також в зернопереробних і складських комплексах. Їхня перевага полягає в простоті конструкції, високій надійності та здатності працювати в умовах значних навантажень.

Для гідропонної системи ланцюговий принцип є особливо важливим, оскільки дозволяє організувати циклічне переміщення лотків по замкнутій траєкторії. Однак звичайний ланцюговий транспортер не враховує потребу в делікатному поводженні з вантажем. Якщо у традиційному конвеєрі допустиме деяке розхитування або нерівномірність положення вантажу, то в нашому випадку це може спричинити технологічні порушення. Саме тому ланцюг повинен працювати не лише як силовий елемент, а як елемент точного позиціонування, а самі лотки мають бути закріплені на ньому через вузли, що гасять коливання та дозволяють зберігати горизонт.



Рисунок 3.2 – Ланцюговий планчастий транспортер

Скребкові конвеєри також мають важливе значення для порівняльного аналізу. У таких машинах вантаж переміщується по жолобу за допомогою скребків, закріплених на ланцюгу. Вони широко використовуються в агропромисловості для транспортування зерна, шроту, гною, силосної маси та інших матеріалів. Конструкція характеризується замкненим рухом тягового органу та поступальним переміщенням вантажу в закритому або напівзакритому каналі.

У нашому випадку принцип скребкового транспортера може бути корисним лише як база для розуміння порційного руху лотків. Але водночас скребковий конвеєр не забезпечує тієї м'якості роботи, яка необхідна для гідропонної системи. Скребок взаємодіє з вантажем через тертя, що для сипучих продуктів є прийнятним, а для лотків із водою – ні. Будь-які різкі поштовхи, зміна прискорення або локальні удари можуть викликати коливання поверхні розчину, порушити рівень у лотку та створити умови для стресу рослин.

Тому при проектуванні гідропонного транспортера слід використовувати не скребкову схему в чистому вигляді, а плавний ланцюгово-підвісний механізм із мінімізацією ударних навантажень. Це ще раз підкреслює, що

головним завданням є не лише переміщення вантажу, а й забезпечення його фізичної стабільності.

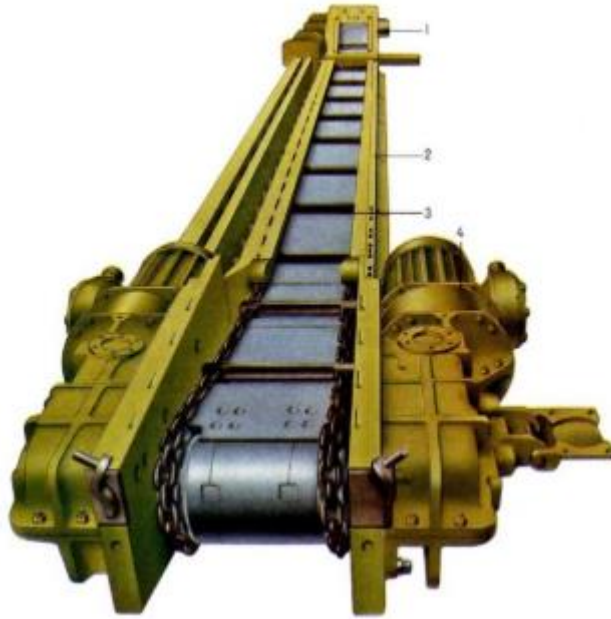


Рисунок 3.3 – Модель скребкового конвеєра

Особливо цікавим аналогом є підвісний конвеєр, оскільки саме він найближче підходить до вимог гідропонної системи. У таких машинах вантаж підвішується до тягового органу через спеціальні підвіски, а переміщення здійснюється по замкненому контуру з поворотами, спусками та підйомами. Підвісні конвеєри широко використовуються на м'ясопереробних, птахопереробних та складальних підприємствах, а також можуть застосовуватися у тваринництві й агропромисловій логістиці.

Саме цей тип транспортера демонструє найбільш вдалу аналогію з гідропонною конструкцією, оскільки дозволяє підвішувати вантаж так, щоб він зберігав задане положення незалежно від траєкторії руху несучого елемента. У нашому випадку лоток із розчином повинен бути закріплений через маятникову підвіску або шарнірний вузол, що автоматично вирівнює його відносно горизонту. Таким чином, навіть якщо несуча рама рухається по похилій або криволінійній ділянці, сам лоток зберігатиме технологічно необхідне положення.

Ця особливість робить підвісний конвеєр найбільш вдалим прообразом для розроблюваної системи. Проте у гідропонній установці вимоги значно жорсткіші, оскільки підвішений вантаж має не тільки зберігати геометричну рівновагу, а й забезпечувати життєздатність рослин та стабільність кореневого середовища.



Рисунок 3.4 – Схема підвісного конвеєра

Окремо слід згадати ескалатор, оскільки він є наочним прикладом транспортної машини, що рухається вздовж похилої площини та забезпечує переміщення об'єктів без зупинки потоку. За кінематичним принципом ескалатор і конвеєр мають багато спільного: обидві машини працюють безперервно, мають ланцюгову або стрічкову основу, а рух забезпечується приводом із редуктором і системою безпеки.

Однак функціональна відмінність є принциповою. Ескалатор переносить людей, а розроблюваний конвеєр – DWC-лотки з водою та рослинами. Людина може компенсувати незначні коливання положення, тоді як у лотку навіть невелике прискорення або гальмування може викликати хвилювання розчину, його перелив або нерівномірний розподіл навантаження по конструкції. Саме тому вимоги до плавності пуску, плавності гальмування та точності фіксації положення тут значно вищі, ніж у звичайних транспортних машинах.

Аналіз наведених аналогів показує, що основне конструктивне завдання розроблюваної машини полягає не лише в переміщенні вантажу, а в

забезпеченні стабільності технологічного середовища під час руху. Саме це відрізняє її від традиційних транспортних машин сільськогосподарського призначення. Якщо для звичайного елеватора, ланцюгового чи скребкового конвеєра достатньо забезпечити міцність, продуктивність і безперервність руху, то в даному випадку необхідно також забезпечити:

горизонтальність лотка на всіх ділянках траєкторії;

мінімальну вібрацію та плавність ходу;

захист від переливу розчину;

відсутність ударних навантажень на кореневу систему;

автоматичне утримання положення при зупинці;

безпечну роботу приводу в режимах пуску, гальмування та аварійного вимкнення.

Тому розглянутий конвеєр слід трактувати як спеціалізовану агротехнічну машину, яка поєднує в собі риси транспортного механізму, гідропонної установки, системи автоматичного керування та безпечного приводу. Її проектування має здійснюватися на стику механіки, електроприводу, гідропоніки та систем безпеки. Саме тому при створенні такої машини доцільно орієнтуватися не на один клас традиційних конвеєрів, а на їх сукупність, адаптуючи кожне конструктивне рішення до специфіки роботи з живими рослинами та поживним розчином.

### **3.2 Обґрунтування конструкції запропонованого конвеєра**

Конструкція похилого DWC-конвеєра формується як складна інтегрована система, у якій поєднуються функції транспортування, утримання та підтримання стабільного технологічного середовища для вирощування рослин. На відміну від класичних транспортних машин, де основним завданням є

переміщення вантажу з мінімальними втратами продуктивності, у даному випадку ключовою вимогою є забезпечення стабільності стану цього вантажу – поживного розчину та рослин. Саме тому конструктивне обґрунтування вузла повинно враховувати не лише механічні, але й гідродинамічні та біологічні аспекти роботи системи.

Базова схема похилого конвеєра передбачає використання двох паралельних ланцюгів, які виконують роль основного тягового органа і рухаються по направляючих уздовж жорсткої рами. Таке рішення забезпечує рівномірний розподіл навантаження і виключає можливість перекосу лотків під час руху. Верхня частина системи оснащена приводними зірочками, які передають обертання від двигуна на ланцюговий контур, тоді як у нижній частині встановлені натяжні зірочки, що компенсують подовження ланцюгів у процесі експлуатації. Замкненість кінематичної схеми дозволяє організувати безперервний цикл руху з чітко визначеною траєкторією, що є необхідною умовою для автоматизованого функціонування установки.

Особливу роль у конструкції відіграє спосіб кріплення лотків. На відміну від стандартних конвеєрних систем, де вантаж жорстко закріплюється або просто лежить на несучій поверхні, у даному випадку використовується маятниковий принцип підвіски. Лоток з'єднаний з ланцюгами через шарнірний кронштейн, що дозволяє йому вільно орієнтуватися під дією сили тяжіння. Завдяки цьому незалежно від кута нахилу робочої гілки він зберігає горизонтальне положення. Така кінематична схема є принципово необхідною, оскільки навіть незначне відхилення від горизонту може спричинити перерозподіл рівня рідини в лотку, перелив поживного розчину або оголення частини кореневої системи рослин.

Таким чином, маятниковий кронштейн виконує не лише роль елемента кріплення, а є функціональним вузлом стабілізації технологічного середовища. Його використання дозволяє відокремити рух транспортної системи від положення робочого об'єкта, що є ключовим принципом у даному типі машин. Фактично це забезпечує кінематичну незалежність лотка від траєкторії руху

ланцюга, що неможливо реалізувати у традиційних транспортерах без спеціальних підвісних систем.

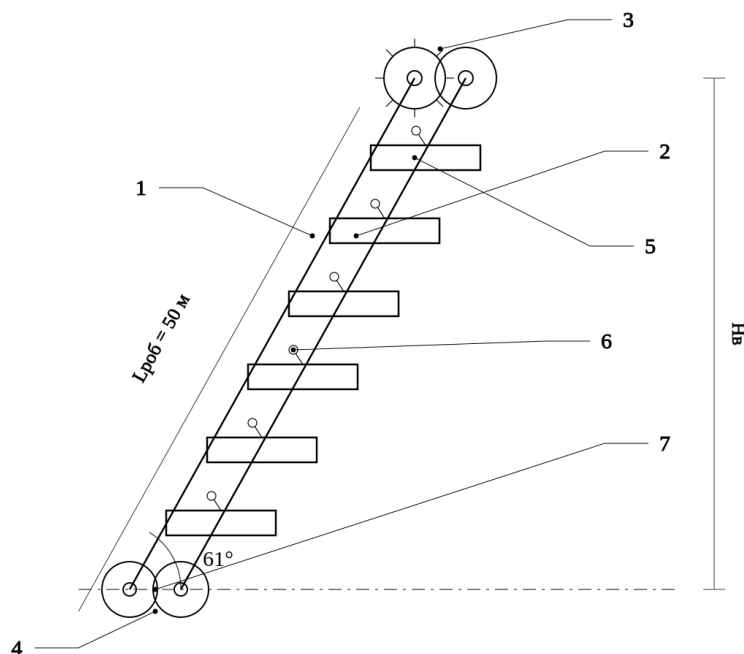
Робота конвеєра організована за принципом крокового переміщення, що відображає специфіку вирощування рослин. Після підготовчих операцій на нижній позиції лоток встановлюється у систему і починає циклічний рух уздовж похилої гілки. При цьому переміщення не є безперервним у класичному розумінні, а відбувається короткими дискретними кроками. Такий режим дозволяє зменшити час роботи приводу, забезпечити точне позиціонування лотків та знизити вплив інерційних процесів у рідині. Повільний і контрольований характер руху сприяє збереженню стабільності поживного середовища, що є критично важливим для нормального розвитку рослин.

У нижній частині траєкторії розташована зона підготовки, де лоток проходить повний цикл обслуговування перед входом у виробничий процес. Тут виконується його очищення, встановлення плота з рослинами та заповнення поживним розчином до заданого рівня. Ця зона повинна бути технологічно доступною і ергономічно організованою, оскільки саме тут відбувається найбільша кількість ручних або напівавтоматичних операцій. Далі лоток переходить до робочої гілки, де відбувається основний етап вирощування. У цей період конвеєр виконує функцію просторового переміщення, одночасно забезпечуючи необхідні умови освітлення та доступу до поживного середовища.

У верхній частині системи організовано зону розвантаження, де виконується збирання врожаю. Після цього здійснюється злив залишкового розчину і підготовка лотка до зворотного руху. Даний етап є завершальним у технологічному циклі і пов'язаний із переходом лотка зі стану робочого в транспортний. У базовій моделі прийнято, що зворотна гілка працює без навантаження, тобто лотки повертаються порожніми. Це дозволяє суттєво спростити розрахунок тягового зусилля і зменшити вимоги до приводу. Однак у реальних умовах повне видалення рідини не завжди можливе, і навіть незначні залишки води можуть створювати додаткове навантаження. Тому при розробці

робочого проєкту необхідно враховувати ймовірність такого режиму і закладати відповідний запас міцності.

Рама конвеєра є несучою частиною всієї конструкції і визначає її геометричну та механічну стабільність. Вона повинна сприймати як постійні, так і змінні навантаження, що виникають у процесі роботи. До постійних належать маса самої конструкції, лотків і поживного розчину, тоді як змінні пов'язані з динамікою руху, запуском і зупинкою системи. Додатково враховуються зовнішні фактори, такі як вітрове навантаження, сніг, обмерзання та температурні впливи. У випадку встановлення системи в закритих приміщеннях частина цих факторів зменшується, однак не зникає повністю, особливо у великих тепличних комплексах.



1 – несучий ланцюг; 2 – зворотний ланцюг; 3 – приводні зірочки; 4 – натяжні зірочки; 5 – лоток; 6 – маятниковий кронштейн; 7 – рама (опора)

Рисунок 3.5 – Загальна схема похилого DWC-конвеєра

Конструкція рами повинна також забезпечувати можливість розміщення технологічних майданчиків, доступ до вузлів обслуговування та безпечну

експлуатацію. Особливу увагу слід приділяти аварійним режимам, таким як застрягання лотка або нерівномірний розподіл навантаження. У таких випадках можливе виникнення локальних перевантажень, які повинні бути враховані при проектуванні. Саме тому на даному етапі наведено лише принципову схему конструкції, тоді як детальний розрахунок металоконструкції доцільно виконувати на наступному етапі проектування.

У цілому запропонована конструкція вузла дозволяє реалізувати головний принцип роботи системи – узгодження механічного руху з технологічними вимогами гідропонного вирощування. Вона забезпечує необхідну жорсткість, надійність і точність роботи, одночасно зберігаючи стабільність середовища для розвитку рослин. Це дає підстави розглядати її як раціональне базове рішення, яке може бути уточнене та деталізоване в подальших етапах інженерного проектування.

### **3.3 Розрахунок параметрів робочого органу**

Робочим органом конвеєра вважається DWC-лоток з плотом і рослинами. Прийняті габарити лотка: довжина 4,0 м, ширина 0,40 м, висота 0,15 м. Площа дна лотка становить

$$S_{л} = 4,0 \times 0,40 = 1,6 \text{ м}^2. \quad (3.1)$$

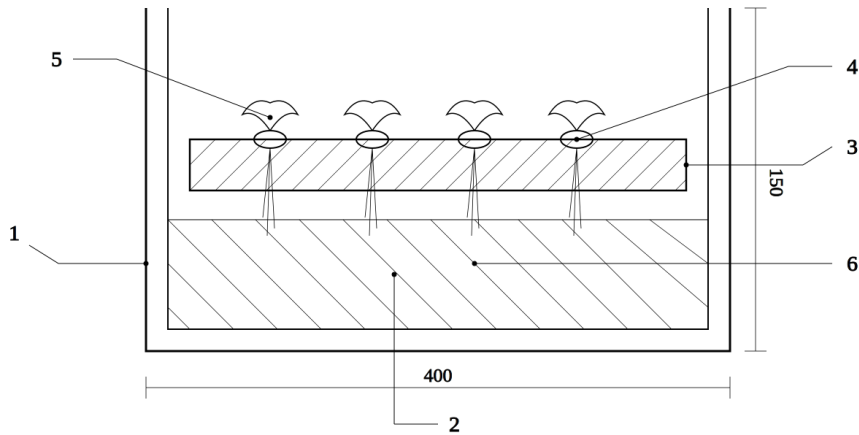
Плот XPS має розміри 3,95×0,35 м, тобто його площа становить

$$S_{пл} = 1,3825 \text{ м}^2.$$

У плоті розміщено два ряди отворів. При кроці 189 мм уздовж довжини в одному ряду розміщується 21 отвір, загалом 42 рослини на лоток. Середня

розрахункова маса товарної рослини прийнята 150 г. Тоді маса врожаю з одного лотка становить

$$G_{л} = 42 \times 0,150 = 6,3 \text{ кг.} \quad (3.2)$$



1 – корпус лотка; 2 – поживний розчин; 3 – XPS-пліт; 4 – посадковий отвір; 5 – рослина; 6 – коренева зона

Рисунок 3.2 – Розріз DWC-лотка з плотом і шаром розчину

Кількість позицій (лотків) на робочій гілці визначають як відношення довжини робочої гілки до кроку між сусідніми позиціями, а добову кількість зібраних лотків – як відношення кількості позицій до тривалості циклу:

$$n_p = L_{роб} / t; \quad n_{доб} = n_p / T; \quad P1 = n_{доб} \times G_{л}, \quad (3.3)$$

де  $L_{роб}$  – довжина робочої гілки конвеєра, м;

$t$  – крок між позиціями лотків, м;

$n_p$  – кількість позицій (лотків) на робочій гілці, шт.;

$n_{доб}$  – кількість лотків, що збираються за добу, шт./добу;

$T$  – тривалість вегетаційного циклу, діб;

$P1$  – добова продуктивність одного конвеєра, кг/добу;

Гл – маса врожаю з одного лотка, кг.

Кількість позицій на робочій гілці визначається діленням довжини робочої гілки на крок:  $n_p = 50/0,5 = 100$  позицій. Оскільки вегетаційний цикл прийнято 25 діб, щодоби до зони збирання доходить  $n_{доб} = 100/25 = 4$  лотки. Добова продуктивність одного конвеєра  $P_1 = 4 \times 6,3 = 25,2$  кг/добу.

Масу наповненого лотка визначають як суму мас корпусу, плота, поживного розчину і рослин. Масу кожної складової обчислюють як добуток її об'єму на густину матеріалу:

$$m_{заг} = m_{л} + m_{п} + m_{р} + m_{рос}, \quad (3.4)$$

де  $m_{заг}$  – загальна маса наповненого лотка, кг;

$m_{л}$  – маса корпусу лотка, кг;

$m_{п}$  – маса XPS-плота, кг;

$m_{р}$  – маса поживного розчину, кг;

$m_{рос}$  – маса рослин на лотку, кг.

Маса корпусу лотка оцінюється через площу поверхонь і товщину поліпропілену. Площа дна  $1,60 \text{ м}^2$ , бокових стінок  $1,20 \text{ м}^2$ , торцевих стінок  $0,12 \text{ м}^2$ , разом  $2,92 \text{ м}^2$ . Для товщини  $4 \text{ мм}$  і густини  $900 \text{ кг/м}^3$  маса корпусу становить приблизно  $10,5 \text{ кг}$ . Густину слід уточнити для конкретної марки харчового поліпропілену, бо реальний діапазон може бути  $890\text{-}910 \text{ кг/м}^3$ .

Маса XPS-плота при густині  $35 \text{ кг/м}^3$ :

$$m_{п} = 3,95 \times 0,35 \times 0,05 \times 35 \approx 2,4 \text{ кг.}$$

Маса поживного розчину при шарі  $50 \text{ мм}$ :

$$m_{р} = 4,0 \times 0,40 \times 0,05 \times 1000 = 80 \text{ кг.}$$

Маса рослин -  $6,3 \text{ кг}$ . Загальна маса наповненого лотка:

$$10,5 + 2,4 + 80 + 6,3 = 99,2 \text{ кг.}$$

Таблиця 3.1– Складові маси одного лотка

Складова	Розрахунок	Маса, кг
Корпус ХОП	$2,92 \times 0,004 \times 900$	10,5
Пліт XPS	$3,95 \times 0,35 \times 0,05 \times 35$	2,4
Розчин	$4,0 \times 0,40 \times 0,05 \times 1000$	80,0
Рослини	$42 \times 0,150$	6,3
Разом наповнений лоток	сума	99,2
Порожній лоток	корпус + плот	12,9

Отриманий результат показує, що 80,6% маси наповненого лотка становить вода. Це ключовий інженерний висновок: усі вузли конвеєра повинні розраховуватися з урахуванням домінуючої маси розчину, а не лише маси рослин чи полімерного лотка.

### 3.4 Обґрунтування окремих параметрів лотків

Лоток пропонується виготовляти зі світлостабілізованого харчового поліпропілену товщиною 4 мм. Для дослідного зразка доцільно передбачити додаткові ребра жорсткості або металеву рамку по периметру, оскільки довжина 4 м при ширині 0,4 м може спричинити прогин при нерівномірному навантаженні. Герметичність швів є критичною вимогою.

Пліт XPS товщиною 50 мм має достатній запас плавучості, але його санітарний ресурс є обмеженням. У технологічному регламенті потрібно

встановити максимальну кількість циклів використання, процедуру миття, контроль кришіння, огляд отворів і критерій списання. Якщо XPS покаже низьку довговічність, альтернативою можуть бути харчові полімерні плоти або змінні касети.

Шарнірні кронштейни мають працювати як маятникова система. Їхнє завдання - утримувати лоток горизонтальним попри нахил рами. Для цього вісь підвісу повинна розташовуватися так, щоб центр маси лотка знаходився нижче осі. У разі перекосу або заїдання шарніра можливий перелив, тому кожен кронштейн має бути захищений від корозії і обладнаний обмежувачем кута.

Базове тягове зусилля визначають як складову сили ваги різниці мас робочої та зворотної гілок уздовж похилої площини. Розрахункове зусилля отримують множенням базового на коефіцієнт уточнення, а момент на приводній зірочці – добутком зусилля на її радіус:

$$F_0 = (M_p - M_z) \times g \times \sin\alpha; \quad (3.5)$$

$$F_{розр} = k \times F_0; \quad (3.6)$$

$$M_{розр} = F_{розр} \times r, \quad (3.7)$$

де  $M_p$  – сумарна маса лотків на робочій гілці, кг;

$M_z$  – сумарна маса лотків на зворотній гілці, кг;

$g$  – прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>;

$\alpha$  – кут нахилу конвеєра, градуси;

$F_0$  – базове тягове зусилля без урахування тертя, Н;

$k$  – коефіцієнт уточнення тягового зусилля;

$F_{розр}$  – розрахункове тягове зусилля, Н;

$M_{розр}$  – розрахунковий момент на приводній зірочці, Н·м;

$r$  – радіус приводної зірочки, м.

Приводний вал повинен передавати високий момент. При базовому

тяговому зусиллі 74 кН і радіусі зірочки 0,10 м момент становить близько 7400 Н·м. З урахуванням коефіцієнта уточнення 1,3-1,6 розрахункове тягове зусилля становить 96-118 кН, а розрахунковий момент на приводній зірочці - близько 9600-11800 Н·м. Це не дрібний вузол, а важкий низькошвидкісний привід, тому редуктор, вал, підшипники і гальмо потребують окремого детального підбору.

З метою безпеки привід повинен мати електромагнітне гальмо нормально замкненого типу, яке утримує систему при знеструмленні. Додатково потрібні механічні уловлювачі або стопорні пристрої, які не дозволяють ланцюгу неконтрольовано рухатися вниз при аварії. Без цього конструкція висотою 43,7 м є неприйнятною для експлуатації.

Таблиця 3.2 - Вузли, що потребують деталізації після розрахунку

Вузол	Попереднє рішення	Що уточнити в робочому проєкті
Ланцюг	Здвоєний важкий роликовий або пластинчастий	Допустиме навантаження, робоче втома, корозія
Вал	Приводний вал верхніх зірочок	Діаметр, кручення, прогин, шпонки
Редуктор	Високомоментний черв'ячний/циліндричний	Ресурс, ККД, самогальмування
Гальмо	Fail-safe електромагнітне	Момент утримання, дублювання
Рама	Оцинкований сталевий профіль	ДБН: вітер, сніг, стійкість, фундамент
Лоток	Харчовий поліпропілен	Жорсткість, герметичність, санітарність

### 3.5 Перевірка критичних ризиків конструкції

Критичний ризик 1 – недооцінка тягового зусилля. Базова формула

$$F_0 = (M_p - M_z) \times g \times \sin \alpha,$$

що враховує різницю мас робочої і зворотної гілки. Однак вона не включає тертя у напрямних, втрати у підшипниках, нерівномірність навантаження, залишкову воду у зворотних лотках, пускові удари та можливий перекид. Тому для робочого проєкту вводиться коефіцієнт уточнення 1,3-1,6.

Критичний ризик 2 - надмірний момент на приводному валу. Навіть при невеликій швидкості руху момент залишається великим. Вал повинен бути розрахований на кручення, втому, концентрації напружень у зоні шпонок і посадок зірочок.

Критичний ризик 3 - вітрове навантаження. Висота 43,7 м означає, що споруда сприймає значний вітер. У роботі не виконується повний розрахунок за ДБН В.1.2-2, але прямо зазначено, що без такого розрахунку будівництво неможливе.

Критичний ризик 4 - хвилювання розчину при пуску і гальмуванні. Шар 50 мм має малу висоту відносно довжини лотка 4 м, тому різкі прискорення можуть спричинити перелив. Частотний перетворювач, плавний пуск і гальмування є обов'язковими. У пілоті треба виміряти максимальну хвилю при різних режимах.

Критичний ризик 5 - санітарне старіння XPS. Біоплівка, пошкодження отворів, відрив дрібних частинок і складність миття можуть зробити XPS слабким місцем. У регламенті потрібно передбачити журнал використання плотів і критерії списання. Якщо ресурс нижчий за прийнятний, конструкція повинна перейти на інший матеріал плота.

Критичний ризик 6 - недоступність обслуговування. Якщо оператор не

може безпечно дістатися до вузла, будь-яка дрібна поломка стає аварійною. Тому майданчики через заданий інтервал, драбини з дугами, страхувальні точки, огороження і дистанційна діагностика є не додатками, а частиною конструкції.

Таблиця 3.3 – Критичні ризики та інженерні заходи

Ризик	Наслідок	Заходи
Обрив або прослизання ланцюга	Падіння лотків, руйнування вузлів	Гальмо, уловлювачі, запас міцності
Перелив розчину	Коротке замикання, втрата живлення	Плавний пуск, перелив, IP65
Біоплівка XPS	Погіршення санітарії	Миття, дезінфекція, списання
Вітер	Втрата стійкості споруди	Розрахунок за ДБН, анкери, зв'язки
Падіння з висоти	Травмування персоналу	Майданчики, пояси, огорожі
Відмова датчика рівня	Переповнення лотка	Дублювання датчиків, аварійний злив

Пілотні випробування повинні проводитися на одному скороченому модулі, а не одразу на повній фермі з багатьма конвеєрами. Пілотний проект має відповісти на п'ять питань: чи стабільно тримається рівень розчину; чи не виникає перелив при русі; чи достатній DO при 40 і 50 мм; чи витримує XPS санітарний цикл; чи відповідає фактична маса рослин розрахунковим 150 г.

Критерії приймання пілотного проекту: відсутність аварійного переливу протягом не менше 30 діб; середня маса рослин не нижче цільової з допустимою варіацією; відсутність критичного біообростання після регламентного миття; відсутність перегріву приводу; стабільне позиціонування лотків з похибкою, яка не заважає операціям посадки та збирання.

### 3.6 Регламент технічного обслуговування та ремонтпридатність

Щозмінне обслуговування включає візуальний огляд лотків, перевірку переливів, огляд ланцюгів у доступних зонах, контроль аварійних кнопок, перевірку показів рН, ЕС і температури розчину, огляд електрошаф на відсутність вологи. Ці операції повинні виконуватися за чек-листом, а не з пам'яті оператора. Ручний хаос у такій системі є прямою втратою ККД.

Щотижневе обслуговування включає перевірку натягу ланцюгів, огляд шарнірних підвісів, очищення датчиків рівня, контроль роботи частотного перетворювача, перевірку гальма, огляд XPS-плотів на механічні пошкодження та біобростання. Результати фіксуються в журналі технічного стану.

Щомісячне обслуговування включає контроль зірочок, підшипників, кріплення рами, анкерів, стану захисних кожухів, датчиків положення і кабельних трас. Для висотної конструкції окремо перевіряються майданчики обслуговування, огороження, страхувальні точки та сходові елементи.

Сезонне обслуговування включає перевірку прозорого покриття, системи затінення, вентиляції, накопичення конденсату, корозійного стану металоконструкції та підготовку до періодів високого вітру чи снігового навантаження. Для експлуатації у кар'єрі також потрібно перевіряти дренаж і можливе накопичення холодного повітря в нижній зоні.

Таблиця 4.2 - Орієнтовний регламент технічного обслуговування

Періодичність	Операції	Документування
Щозмінно	Огляд лотків, рівня, датчиків, аварійних кнопок	Чек-лист оператора
Щотижня	Натяг ланцюга, шарніри, гальмо, XPS	Журнал ТО
Щомісяця	Зірочки, підшипники, анкери, кабелі	Акт технічного огляду
Сезонно	Покриття, вітер, сніг, вентиляція, корозія	Сезонний акт готовності

### 3.7 Організація виробничого процесу та операційна карта

Операційна карта потрібна для того, щоб показати послідовність дій оператора і обладнання. Без такої карти важко оцінити, чи справді конвеєр зменшує трудові витрати, чи лише переносить їх у ручне обслуговування.

Операція 1 - підготовка лотка. Оператор перевіряє чистоту корпусу, герметичність, стан переливного штуцера і відсутність пошкоджень. Якщо лоток має тріщину або забруднення, він не допускається до циклу. Це правило повинно бути автоматизоване через простий чек-лист, інакше дефект потрапить у виробничий цикл на 25 діб.

Операція 2 - підготовка плота. XPS-пліт оглядається, отвори очищаються, у кошики встановлюється розсада. На цьому етапі бажано маркувати партію, щоб потім пов'язати результат вирощування з датою посадки, якістю розсади, режимом освітлення і параметрами розчину.

Операція 3 - заповнення лотка. Поживний розчин подається до рівня  $50 \pm 5$  мм. Автоматичний датчик рівня повинен зупиняти подачу. Оператор не має вручну доливати розчин, бо це створює різну масу лотків і різні умови для рослин.

Операція 4 - переміщення. Конвеєр виконує 4 кроки по 0,5 м за добу. Пуск і гальмування виконуються плавно. Після кожного кроку контролюється позиція, відсутність переливу і аварійних сигналів. Якщо виник перелив, наступний крок заборонений до встановлення причини.

Операція 5 - збирання врожаю. На верхній позиції лоток фіксується, рослини знімаються, маса партії записується, залишки розчину зливаються, лоток готується до зворотного ходу. Дані маси потрібні не для звітності заради звітності, а для перевірки реальної продуктивності проти розрахункових 25,2 кг/добу.

Операція 6 - миття і повторний запуск. Після зворотного ходу лоток і плот проходять санітарну обробку. Якщо XPS не витримує миття або

накопичує біоплівку, його замінюють. Цей пункт критичний, бо без санітарії DWC-система швидко стає джерелом технологічних втрат.

Таблиця 4.3 - Операційна карта роботи одного лотка

№	Операція	Контрольний параметр
1	Огляд лотка	Герметичність, чистота
2	Встановлення плота	Стан XPS, кількість рослин
3	Заповнення	Рівень $50 \pm 5$ мм, рН, ЕС
4	Переміщення	Позиція, відсутність переливу
5	Збирання	Маса партії, якість рослин
6	Миття	Відсутність біоплівки і пошкоджень

Операційна карта є необхідним інструментом для організації роботи DWC-конвеєра, оскільки вона забезпечує чітку послідовність дій оператора та узгодження їх із роботою обладнання. Її наявність дозволяє об'єктивно оцінити ефективність системи, запобігти виникненню технологічних помилок і мінімізувати людський фактор. Аналіз операцій показує, що ключовими умовами стабільної роботи є стандартизація підготовки лотків і плота, автоматизований контроль рівня розчину, плавний і контрольований режим переміщення, а також облік врожайності та обов'язкова санітарна обробка. Без дотримання цих вимог навіть технічно досконалий конвеєр не забезпечить очікуваного зниження трудових витрат і продуктивності, а лише змістить навантаження у сферу обслуговування і усунення наслідків помилок.

## **4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ**

### **4.1. Моделювання небезпечних ситуацій**

Небезпечні ситуації в похилому гідропонному конвеєрі виникають через поєднання води, електрообладнання, великої висоти, рухомих ланцюгів і хімічних реагентів для корекції рН. Така комбінація потребує системного підходу до охорони праці.

Сценарій 1: перелив поживного розчину на електрообладнання. Причини - відмова датчика рівня, різке гальмування, забитий перелив або помилка оператора. Наслідки - коротке замикання, корозія, зупинка конвеєра, ураження електричним струмом. Заходи - електрообладнання IP65, ПЗВ 30 мА, окремі кабельні канали, аварійний злив, датчик протікання.

Сценарій 2: заземлення працівника рухомих ланцюгом. Причини - зняття кожуха, обслуговування без блокування, несанкціонований запуск. Наслідки - тяжкі травми. Заходи - захисні кожухи, блокування доступу, кнопки аварійної зупинки на кожному рівні, процедура lockout/tagout перед ремонтом.

Сценарій 3: падіння з висоти. Висота споруди 43,7 м робить цей ризик найважчим за наслідками. Заходи - стаціонарні майданчики з огорожею не менше 1,1 м, сходи з дугами, страхувальні точки, інструктаж, заборона роботи однією особою на висоті, журнал допуску.

Сценарій 4: хімічний опік кислотами або лугами для корекції рН. Заходи - зберігання реагентів у промаркованих ємностях, окуляри, рукавички, фартух, вентиляція, душ або пункт промивання очей, інструкція першої допомоги.

## 4.2 Вимоги до техніки безпеки при експлуатації технологічного обладнання

Перед запуском оператор перевіряє стан кожухів, відсутність сторонніх предметів на напрямних, рівень розчину, справність аварійних кнопок і відсутність людей у небезпечній зоні. Запуск без звукового або світлового попередження забороняється. Під час руху лотків не допускається ручне втручання в ланцюги, кронштейни або зірочки.

Таблиця 4.1 – Оцінка основних виробничих ризиків

Небезпека	Ймовірність	Тяжкість	Рівень ризику	Заходи
Електрострум	Низька за нормальної експлуатації	Критична	Високий	IP65, ПЗВ, заземлення
Падіння висоти	Середня	Критична	Високий	Огородження, пояси, майданчики
Защемлення ланцюгом	Низька	Тяжка	Середній	Кожухи, блокування, стоп-кнопки
Хімічні реагенти	Середня	Середня	Середній	ЗІЗ, маркування, вентиляція
Біологічне забруднення	Середня	Середня	Середній	Регламент миття і дезінфекції
Перелив води	Середня	Середня/тяжка	Середній	Датчики, аварійний злив

Ремонтні роботи виконуються лише після повної зупинки, відключення живлення, механічного блокування і вивішування попереджувальної таблички. Для висотних робіт потрібні не менше двох осіб, засоби зв'язку і страхувальні системи. Усі дії з кислотами та лугами виконуються в захисних окулярах і рукавичках.

Система керування повинна фіксувати аварійні зупинки. Повторний запуск після аварії допускається тільки після встановлення причини.

### **4.3 Вплив на довкілля**

Гідропонна система з замкненим контуром потенційно зменшує витрати води порівняно з ґрунтовим вирощуванням. Однак екологічність не виникає автоматично. Відпрацьований поживний розчин не можна скидати безконтрольно, оскільки він містить азот, фосфор, калій та інші солі. Потрібно передбачити збір, корекцію, повторне використання або утилізацію згідно з місцевими вимогами.

Полімерні компоненти - лотки, кошики, XPS-плоти - мають ресурс і після зношування стають відходами. Тому при виборі матеріалів треба враховувати не лише початкову ціну, а й можливість миття, повторного використання, переробки або безпечної утилізації. Особливо це стосується XPS, який може кришитися і створювати дрібні полімерні частинки.

Енергетичний вплив визначається насамперед LED-освітленням, насосами, кліматом і приводом. Сам привід через малу швидкість має невелике добове споживання, але LED може бути значною статтею витрат електроенергії. Тому управління освітленням за DLI є не просто агрономічною функцією, а екологічним і економічним заходом.

#### 4.4 Заходи з охорони та раціонального використання ресурсів

Раціональне використання води забезпечується замкненим контуром, датчиками рівня, переливами, резервуаром збору і повторною корекцією рН/ЕС. Витік води повинен фіксуватися датчиком протікання, а під конвеєром доцільно передбачити збірні лотки або дренажні канали.

Раціональне використання енергії забезпечується прозорим покриттям, орієнтацією робочої площини на зимово-весняне сонце, компенсаційним LED замість постійного, плавним пуском приводу і використанням насосів з частотним керуванням. Енергетичний аудит повинен проводитися на пілотному проекті з вимірюванням витрат кВт·год на 1 кг продукції.

Раціональне використання матеріалів забезпечується модульністю лотків, ремонтпридатністю підвісів, уніфікацією кріплень і регламентом технічного обслуговування. Якщо вузол важко обслужити, його ресурс у реальному виробництві буде нижчим за розрахунковий, тому доступність ремонту є частиною екологічної та економічної ефективності.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі розроблено і обґрунтовано конструктивно-технологічну схему похилого гідропонного конвеєра DWC для вирощування листових салатів на фермі Green Wave. Робота приведена до структури, рекомендованої методичними вказівками: оглядова частина, рекомендації з удосконалення технології, проектна частина, охорона праці, висновки, перелік посилань і додатки.

Обґрунтовано вибір DWC-системи як компромісу між технологічною стабільністю кореневої зони і збільшенням механічної маси. Порівняння шарів розчину 30, 40 і 50 мм показало, що 50 мм забезпечує найбільшу буферність, але створює максимальне навантаження. Тому остаточне значення шару має бути підтверджене пілотними випробуваннями.

Виконано геометричний розрахунок: при довжині робочої гілки 50 м і куті нахилу  $61^\circ$  вертикальна висота становить 43,7 м, горизонтальна проєкція - 24,2 м. Кількість позицій лотків на робочій гілці становить 100, загальна кількість лотків з урахуванням зворотної гілки - 200.

Розраховано продуктивність: один лоток містить 42 рослини, маса врожаю з лотка становить 6,3 кг, добова продуктивність одного конвеєра - 25,2 кг/добу. Для цільового показника 1500 кг/добу потрібно близько 60 конвеєрів, фактична розрахункова продуктивність - 1512 кг/добу.

Визначено масу наповненого лотка 99,2 кг, з яких 80 кг припадає на поживний розчин. Це доводить, що головним фактором силового розрахунку є маса води. Базове тягове зусилля становить близько 74 кН, а після введення коефіцієнта уточнення 1,3-1,6 розрахункове тягове зусилля становить 96-118 кН. Відповідний момент на приводній зірочці радіусом 0,10 м становить близько 9,6-11,8 кН·м.

Показано, що встановлена потужність двигуна 0,37 кВт є попередньо допустимою за умови дуже малої швидкості руху: при проходженні кроку 0,5 м за 5 хв,  $F = 118$  кН і  $\eta = 0,7$  потрібна потужність становить близько 0,28 кВт.

Водночас редуктор, гальмо, вал, підшипники, ланцюги і рама повинні проектуватися як високомоментна система з урахуванням динаміки, тертя, втоми, корозії та аварійних режимів.

Виконано попередню перевірку освітлення і DLI. Кут  $61^\circ$  є раціональним для лютого-березня на широті близько  $50^\circ$  пн. ш., але не є універсальним оптимумом на весь рік. У грудні потрібне LED-досвічування або інший кут, а влітку - затінення і вентиляція.

Оцінено критичні ризики: обрив ланцюга, перелив розчину, падіння з висоти, вітрове навантаження, санітарне старіння XPS-плотів, перекид лотків і відмова датчиків. Запропоновано заходи: fail-safe гальмо, механічні уловлювачі, датчики рівня, захисні кожухи, майданчики обслуговування, регламент миття і пілотні випробування.

Практична рекомендація: перед масштабуванням до ферми з 60 конвеєрів необхідно виготовити один пілотний модуль, перевірити 40 і 50 мм шару розчину, виміряти DLI, DO, хвилювання розчину, фактичну масу рослин, ресурс XPS і питому енергію на 1 кг продукції. Тільки після цього конструкція може переходити до робочого проектування.

**ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ**

1. ДСТУ 3008:2015. Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура та правила оформлювання. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2016. 32 с.
2. ДСТУ 8302:2015. Інформація та документація. Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2016. 20 с.
3. ДСТУ ГОСТ 2.001:2006. Єдина система конструкторської документації. Загальні положення. Київ, 2006. 14 с.
4. ДСТУ ГОСТ 2.104:2006. Єдина система конструкторської документації. Основні написи. Київ, 2006. 22 с.
5. Олексюк В.П., Сташків М.Я. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи для студентів першого рівня вищої освіти за ОПП «Агроінженерія». Тернопіль: ТНТУ ім. І. Пулюя, 2023. 46 с.
- 5а. Патент на корисну модель № 154025 UA. Гвинтовий конвеєр-змішувач з обертовим кожухом / Рогатинський Р. М., Дячун А. Є., Гевко Ів. Б., Бабій А. В., Довбуш Т. А., Довбуш А. Д., Хомик Н. І., Сташків М. Я., Олексюк В. П., Цьонь Г. Б. № заявки u202301805; заявл. 18.04.2023; опубл. 28.09.2023, бюл. № 39/2023.
6. Resh H.M. Hydroponic Food Production. Boca Raton: CRC Press, 2013. 560 p.
7. Jones J.B. Hydroponics: A Practical Guide for the Soilless Grower. Boca Raton: CRC Press, 2005. 440 p.
8. Savvas D., Gruda N. Application of soilless culture technologies in the modern greenhouse industry. European Journal of Horticultural Science. 2018. Vol. 83. P. 280-293.
9. Kozai T., Niu G., Takagaki M. Plant Factory: An Indoor Vertical Farming System for Efficient Quality Food Production. Academic Press, 2019. 516 p.

10. ДСТУ 6008:2008. Салати свіжі. Технічні умови. Київ: Держспоживстандарт України, 2009.
11. ГОСТ 13568. Ланцюги приводні роликові та втулкові. Технічні умови.
12. ДБН В.1.2-2:2006. Навантаження і впливи. Норми проектування. Київ: Мінбуд України, 2006.
13. НПАОП 0.00-1.21-98. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів.
14. ASABE Standards. Design and operation of greenhouse systems. American Society of Agricultural and Biological Engineers.
15. ISO 22000:2018. Food safety management systems - Requirements for any organization in the food chain.
16. Виробничі дані та технологічні спостереження Green Wave Organic щодо вирощування листових салатів у гідропонних системах.
17. Авторські ескізи та розрахункові матеріали Нового В. щодо похилого DWC-конвеєра Green Wave Organic.

## Додатки

## Додаток А

### Програма пілотних випробувань

Пілотний модуль повинен перевіряти слабкі місця конструкції. Мінімальна тривалість випробувань - один повний цикл вирощування 25-30 діб. Бажано провести два цикли: перший для механіки і герметичності, другий для технологічної стабільності рослин.

Параметри для щоденного контролю: температура повітря, температура розчину, рН, ЕС, DO, рівень розчину, фактичний DLI, тривалість LED-досвічування, відхилення положення лотка, наявність переливу, стан XPS-плотів, візуальний стан коренів, маса вибіркового рослин.

Критерії приймання: відсутність аварійного переливу; відсутність критичного нагріву редуктора; стабільний DO не нижче 6 мг/л; рівномірність рослин у межах прийнятої технологічної похибки; відсутність руйнування XPS; можливість миття лотка без ручних непродуктивних операцій.

## Додаток Б

### Основні розрахункові формули

$$L_{\text{роб}} = T \times z \times t = 25 \times 4 \times 0,5 = 50 \text{ м.}$$

$$H_{\text{в}} = L_{\text{роб}} \times \sin \alpha = 50 \times \sin 61^\circ \approx 43,7 \text{ м.}$$

$$B = L_{\text{роб}} \times \cos \alpha = 50 \times \cos 61^\circ \approx 24,2 \text{ м.}$$

$$n_{\text{р}} = L_{\text{роб}} / t = 50 / 0,5 = 100 \text{ позицій на робочій гілці.}$$

$$G_{\text{л}} = n_{\text{прос}} \times m = 42 \times 0,150 = 6,3 \text{ кг.}$$

$$P_1 = n_{\text{доб}} \times G_{\text{л}} = 4 \times 6,3 = 25,2 \text{ кг/добу.}$$

$$m_{\text{заг}} = m_{\text{л}} + m_{\text{п}} + m_{\text{р}} + m_{\text{прос}} = 10,5 + 2,4 + 80 + 6,3 = 99,2 \text{ кг.}$$

$$F_0 = (M_{\text{р}} - M_{\text{з}}) \times g \times \sin \alpha \approx 74 \text{ кН.}$$

$$F_{\text{розр}} = 1,3 \dots 1,6 \times F_0 \approx 96 \dots 118 \text{ кН. } M_{\text{розр}} = F_{\text{розр}} \times r \approx 9600 \dots 11800 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

$$P = F \times v / \eta \approx 0,28 \text{ кВт; прийнято двигун } 0,37 \text{ кВт.}$$

#### Умовні позначення до формул:

де  $T$  – тривалість вегетаційного циклу, діб;

$z$  – кількість кроків переміщення лотків за добу;

$t$  – крок між позиціями лотків, м;

$L_{\text{роб}}$  – довжина робочої гілки конвеєра, м;

$H_{\text{в}}$  – вертикальна висота конвеєра, м;

$B$  – горизонтальна проєкція конвеєра, м;

$\alpha$  – кут нахилу конвеєра, градуси;

$n_{\text{р}}$  – кількість позицій (лотків) на робочій гілці, шт.;

$n_{\text{доб}}$  – кількість лотків, що збираються за добу, шт./добу;

$n_{\text{прос}}$  – кількість рослин на одному лотку, шт.;

$m$  – середня маса однієї товарної рослини, кг;

$G_{\text{л}}$  – маса врожаю з одного лотка, кг;

$P_1$  – добова продуктивність одного конвеєра, кг/добу;

$m_{\text{л}}$  – маса корпусу лотка, кг;

$m_{\text{п}}$  – маса XPS-плота, кг;

$m_{\text{р}}$  – маса поживного розчину, кг;

$m_{\text{рос}}$  – маса рослин на лотку, кг;

$m_{\text{заг}}$  – загальна маса наповненого лотка, кг;

$M_{\text{р}}$  – сумарна маса лотків на робочій гілці, кг;

$M_{\text{з}}$  – сумарна маса лотків на зворотній гілці, кг;

$g$  – прискорення вільного падіння,  $\text{м/с}^2$ ;

$F_0$  – базове тягове зусилля без урахування тертя, Н;

$F_{\text{розр}}$  – розрахункове тягове зусилля з коефіцієнтом уточнення, Н;

$M_{\text{розр}}$  – розрахунковий момент на приводній зірочці, Н·м;

$r$  – радіус приводної зірочки, м;

$P$  – потужність приводу, Вт;

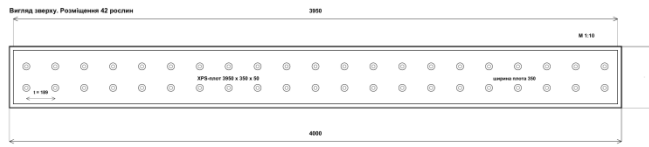
$v$  – швидкість руху ланцюга, м/с;

$\eta$  – коефіцієнт корисної дії передачі.



**DWC-ЛОТОК З XPS-ПЛОТОМ І ШАРОМ РОЗЧИНУ**

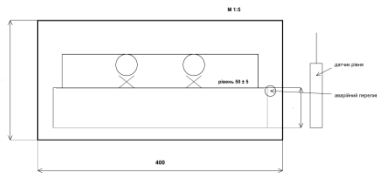
Демонстраційне креслення до описувачівної роботи фахівця



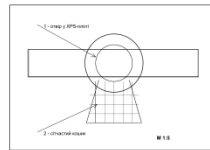
Поздовжній розріз А-А. Корпус, плит і шар розчину



Поперечний розріз Б-Б. Рішення розчину / датчик



Вузол В. Отвір плота і стічний кошик



**ТЕХНІЧНІ ДАНІ ДО DWC-ЛОТКА**

Геометричні параметри	
Довжина лотка	4000 мм
Ширина лотка	400 мм
Висота лотка	100 мм
Товщина полікарбонату	4 мм
Товщина XPS-плота	50 мм ± 0,05 мм
Товщина XPS-плота	50 мм
Висота стінки лотка	100 мм

Технологічні параметри	
Кількість рослин	42 шт.
Система поливу	2 рядки по 21
Рішення розчину	10 x 10 мм
Матеріал корпусу	акриловий полікарбонат
Матеріал плити	XPS, екструдований, вилітаний
Матеріал шару	цементно-піщаний

Складні ваги окремих лотків	
Корпус лотка	10,5 кг
XPS-плот	2,4 кг
Плитовий розчин	40,0 кг
Рішення	6,3 кг
Рішення полікарбонатної плити	19,2 кг
Полікарбонат лотка	12,3 кг

**Примітки до креслення**

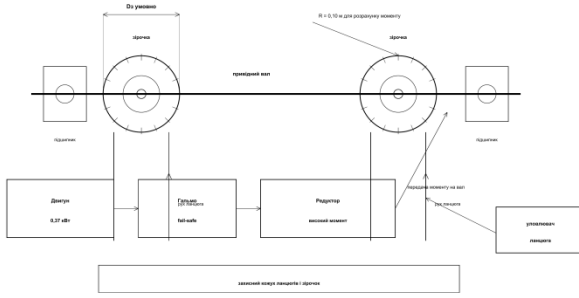
1. Креслення демонстраційне, не є типовим робочим кресленням.
2. Об'ємний розчин шару розчину утворюється на фабричній лінії.
3. Гарантована щільність шару розчину перевіряється у заводі.
4. Решітка на корпусі лотка і датчик розчину.

**Лоток з шаром розчину**

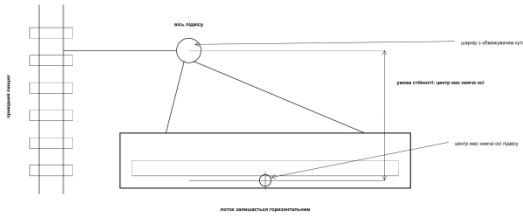
ПРИВІДНИЙ ВУЗОЛ, ЛАНЦЮГ І ШАРНІРНА ПІДВІСКА

Демонстраційне з'решення до магістральної роботи Бюро «Інженер»

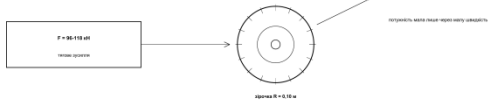
Вид А. Верхній привідний вузол консери



Вид Б. Шарнірна підвіска DWC-1000



Розрахункова схема приводу



ТЕХНІЧНІ ДАНІ ДО ПРИВІДНОГО ВУЗЛА

Розрахункові параметри	
Вага вантажу	Вага 90,118 кг
Розрахункова вага вантажу	90,118 кг
Увага: вага вантажу	0,10 м
Маса на привідній шестерні	90,118 кг
Швидкість ланцюга	0,00000 м/с
Розрахункова потужність	Вага 0,37 кВт
Привідний двигун	0,37 кВт

Елементи вузла	
1. Силова частина	0,37 кВт
2. Ланцюг	ланцюг узелів ланцюгів / дерев
3. Редуктор	ланцюг узелів ланцюгів / дерев
4. Привідний вал	шарнірна підвіска
5. Шестерні	ланцюг узелів ланцюгів / дерев
6. Шарнірна підвіска	шарнірна підвіска з обмеженою рух

Вимоги безпеки	
Утримання при експлуатації	Утримання при експлуатації
Обсяг обслуговування	Утримання при експлуатації
Вимоги з утримання вантажу	Утримання при експлуатації
Увага: вага вантажу	Утримання при експлуатації
Ланцюг узелів ланцюгів / дерев	Утримання при експлуатації
Ланцюг узелів ланцюгів / дерев	Утримання при експлуатації
Ланцюг узелів ланцюгів / дерев	Утримання при експлуатації

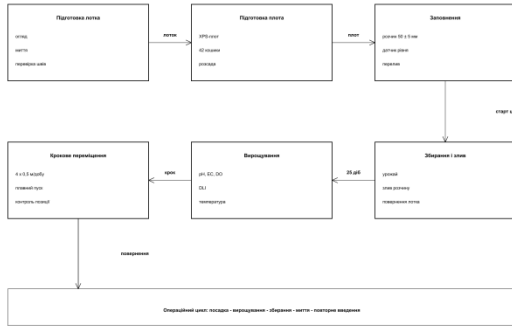
Примітки до з'решення

1. Привідний двигун, що працює в режимі роботи.
2. Вага вантажу, що працює в режимі роботи.
3. Швидкість 0,37 м/с на основі ваги вантажу ланцюга.
4. На вантаж вказано для розрахунку вантажу ланцюга.

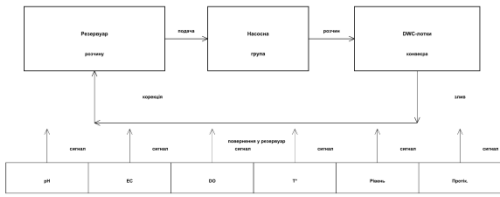
ТЕХНОЛОГІЧНА СХЕМА, АВТОМАТИКА І БЕЗПЕКА

Демонстраційне креслення для автоматизації роботи безпечки

1. Технологічний маршрут DWS-лінійки



2. Контроль параметрів розрахунку і контролю параметрів



4. Зони безпеки



3. Автоматика, DLJ і аварійний ді



ТЕХНІЧНІ ДАНІ ДО ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СХЕМИ

Розміри пристрою	
Висота пристрою	5,5 м
Кількість ліній	4 лінійки
Довжина ліній	2 лінійки
Ціна пристрою	25,000
Розмір пристрою	50 x 5 мм
Висота пристрою	10-15 мм
Корпус пристрою	14 DLJ

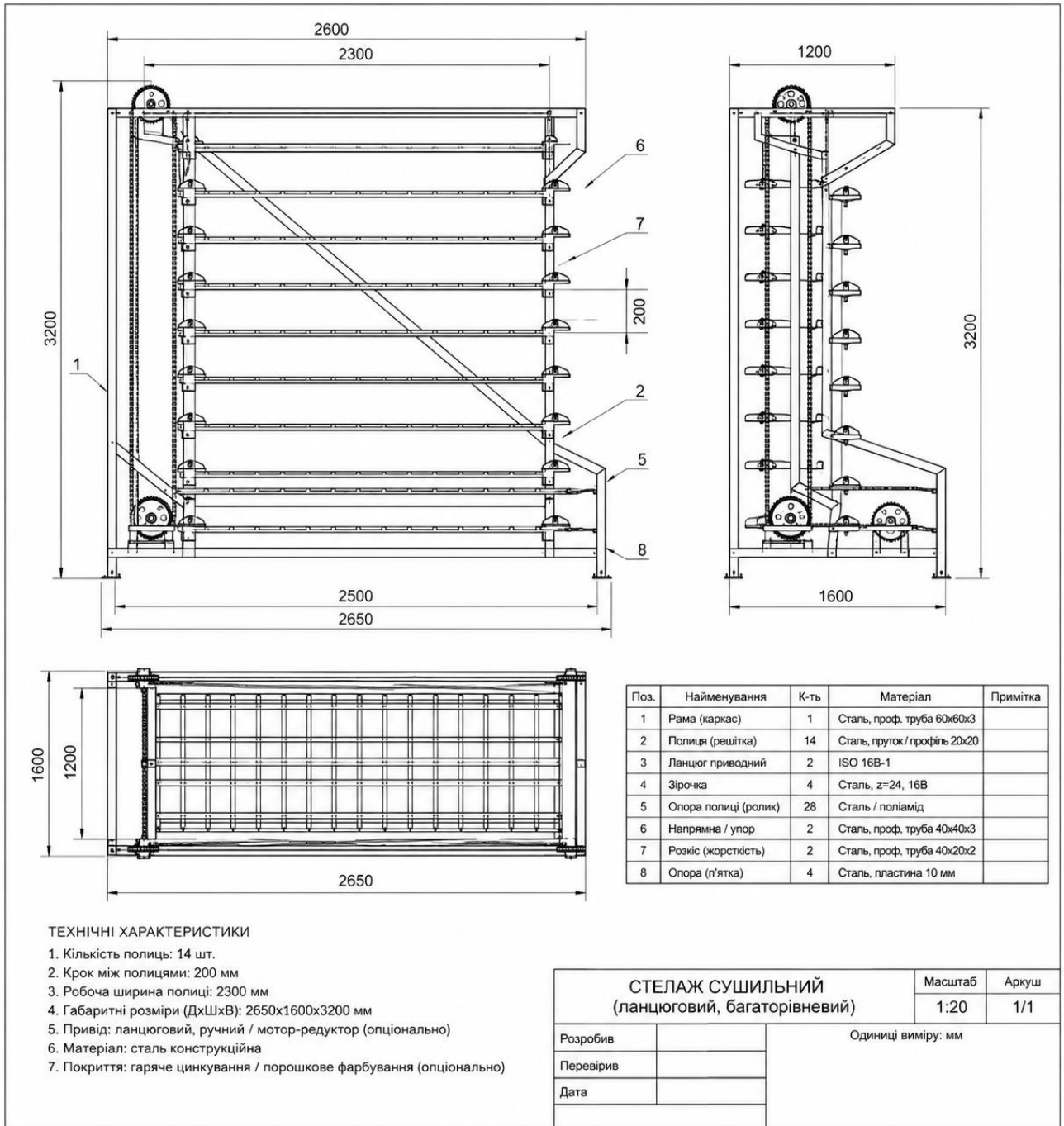
Характеристики параметрів	
RFU	5,5 x 2
RFU	1,2 x 1,8 мм
RFU	10 мм x 8 мм
Температура пристрою	18-20°C
Висота пристрою	50-75%
Розмір пристрою	лінійка лінійка

Аварійні системи (АІ)	
Лінійка аварійного захисту	лінійка лінійка
Лінійка аварійного захисту	лінійка лінійка
Лінійка аварійного захисту	лінійка лінійка
Лінійка аварійного захисту	лінійка лінійка
Лінійка аварійного захисту	лінійка лінійка
Лінійка аварійного захисту	лінійка лінійка

Примітки до креслення

1. Склад пристрою: лінійка, лінійка, лінійка.
2. Параметри DLJ розраховані на основі параметрів лінійки.
3. Зона безпеки пристрою: лінійка лінійка.
4. Це пристрій використовується для автоматизації роботи лінійки.

**ДОДАТОК Г****Ілюстрації існуючих вертикальних конвеєрних систем та схематичні креслення****Рисунок Г.1 – Вертикальна конвеєрна система вирощування (фото)**



**Рисунок Г.2 – Стелаж сушільний ланцюговий багаторівневий  
(складальне креслення)**

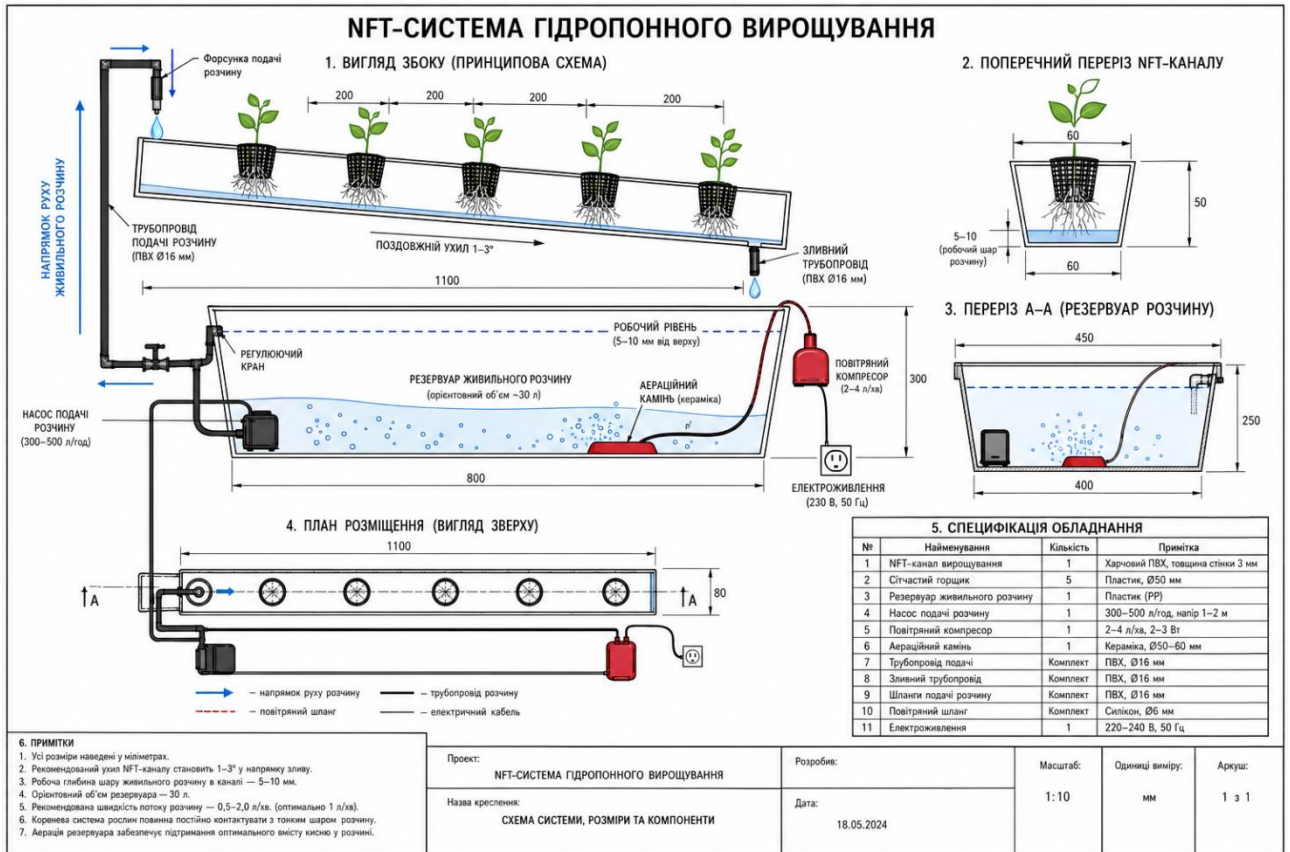
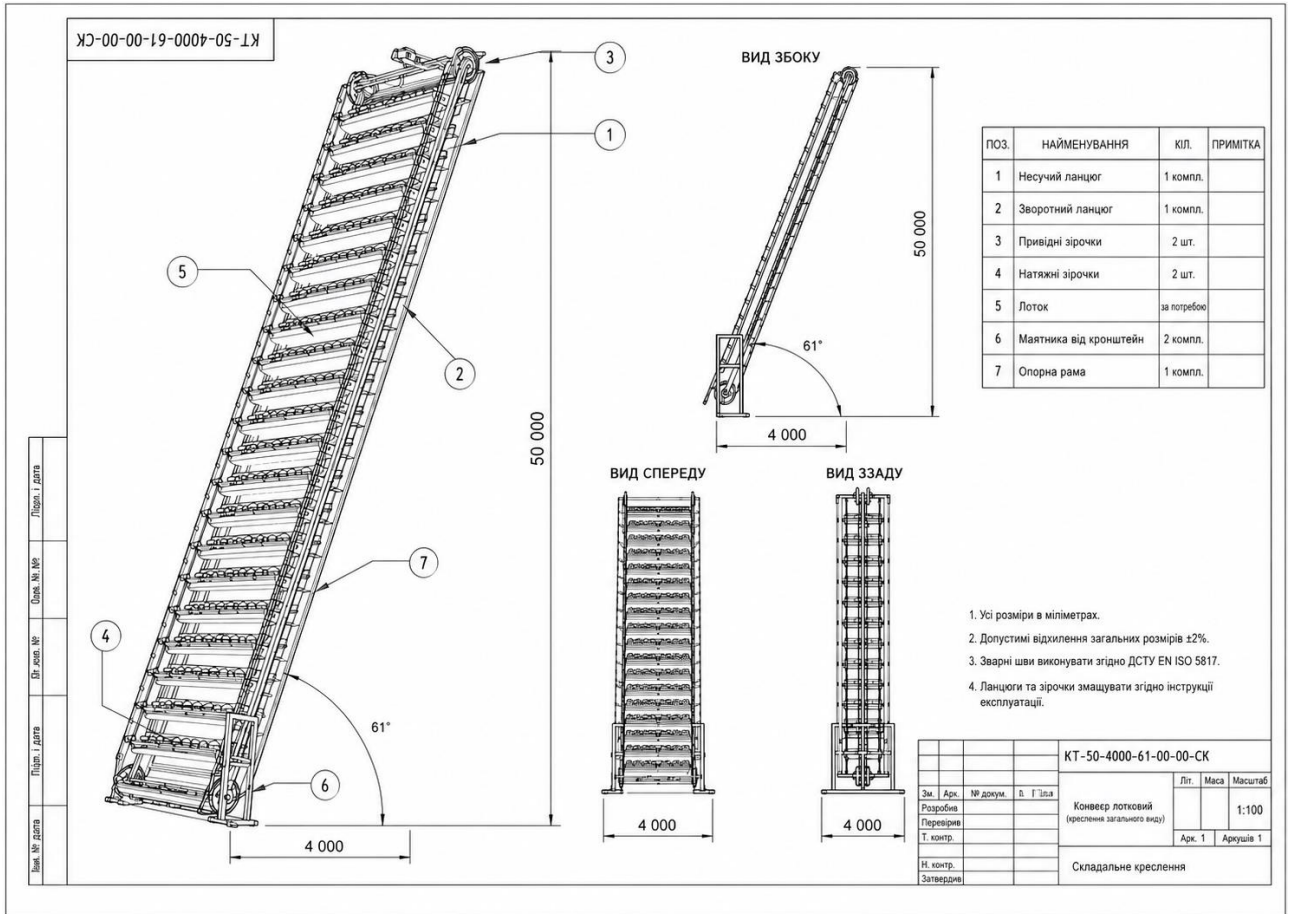


Рисунок Г.3 – NFT-система гідропонного вирощування (схема)



**Рисунок Г.4 – Конвеєр лотковий KT-50-4000-61-00-00-CK (креслення загального виду, масштаб 1:100)**