

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВЕТЕРИНАРНОЇ
МЕДИЦИНИ ТА БІОТЕХНОЛОГІЙ ІМЕНІ С.З.ГЖИЦЬКОГО
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ
ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА АГРОІНЖЕНЕРІЇ ТА ТЕХНІЧНОГО СЕРВІСУ
ІМЕНІ ОЛЕКСАНДРА СЕМКОВИЧА

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

другого (магістерського) рівня вищої освіти

на тему: «ОБГРУНТУВАННЯ ЗАСТОСУВАННЯ ІННОВАЦІЙНИХ
МЕТОДІВ ОЧИЩЕННЯ ФОРСУНОК В АЕРОПОННОМУ ВИРОЩУВАННІ
РОСЛИН»

Виконав: студент VI курсу групи Аін-61

Спеціальності 208 «Агроінженерія»
(шифр і назва)

Володимир Варениця
(Ім'я та прізвище)

Керівник: к.т.н. Олександр Левчук
(Ім'я та прізвище)

ДУБЛЯНИ 2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
 ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
 ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ
 ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ
 ТЕХНОЛОГІЙ
 КАФЕДРА АГРОІНЖЕНЕРІЇ ТА ТЕХНІЧНОГО СЕРВІСУ
 ІМЕНІ ОЛЕКСАНДРА СЕМКОВИЧА
 Освітній Ступінь «Магістр»
 Спеціальність 208 «Агроінженерія»

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
 Зав. кафедри _____
 (підпис)

к.т.н., доцент Шарибура А.О.
 “ ” _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ на кваліфікаційну роботу студенту

ВАРЕНИЦЯ ВОЛОДИМИР ІГОРОВИЧ

1. Тема роботи: «Обґрунтування застосування інноваційних методів очищення форсунок в аеропонному вирощуванні рослин»

Керівник роботи: Левчук Олександр Васильович, к.т.н.

Затверджена наказом по університету №140/к-с від 28.02.2025 року

2. Строк здачі студентом закінченої роботи 10.12.2025 року

3. Вихідні дані до роботи: 1) особливості роботи форсунок при аеропонному вирощуванні рослин; 2) способи очищення форсунок; 3) методи математичної статистики; 4) стандарти прикладної статистики.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

4.1. Аналіз стану питання

4.2. Технологічні особливості систем живлення в аеропоніці

4.3. Методика експериментальних досліджень

4.4. Опрацювання результатів досліджень

4.5. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях

Висновки і пропозиції

5. Перелік графічного ілюстраційного матеріалу:

Графічна частина до кваліфікаційної роботи оформляється у вигляді презентації.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата		Відмітка про виконання
		завдання видав	завдання прийняв	
1, 2, 3, 4	<i>Левчук О.В., к.т.н., в.о. доцента кафедри агроінженерії та технічного сервісу ім. проф. О. Семковича</i>			
5	<i>Городецький І.М., к.т.н., доцент кафедри фізики, інженерної механіки та безпеки виробництва</i>			

7. Дата видачі завдання «28» лютого 2025 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Відмітка про виконання
1	<i>Аналіз стану питання</i>	<i>28.02.25-25.04.25</i>	
2	<i>Технологічні особливості систем живлення в аеропоніці</i>	<i>28.04.25-27.06.25</i>	
3	<i>Методика експериментальних досліджень</i>	<i>30.06.25-29.08.25</i>	
4	<i>Опрацювання результатів досліджень</i>	<i>01.09.25-26.09.25</i>	
5	<i>Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях</i>	<i>29.09.25-31.10.25</i>	
6	<i>Оформлення пояснювальної записки</i>	<i>03.11.24-10.12.25</i>	

Студент _____ Володимир Варениця
(підпис)

Керівник роботи _____ Олександр Левчук
(підпис)

УДК: 658.51:631.3

Магістерська робота: 76с. текст. част., 22 рис., 14 табл., 19 слайдів., 40 джерел.

Обґрунтування застосування інноваційних методів очищення форсунок в аеропонному вирощуванні рослин

Варениця В.І. Кафедра агроінженерії та технічного сервісу ім.

О.Семковича. – Дубляни, Львівський НУВМБ ім. С.З.Гжицького, 2025.

В даній дипломній роботі розглянуто питання впливу факторів, що впливають на забруднення систем зрошування в аеропоніці і способи їх очищення.

Здійснено лабораторні дослідження та опрацьовано їх результати. На підставі них встановлено вплив параметрів миття на якість очищення форсунок.

Також у дипломній роботі розглянуто питання охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях.

Ключові слова: аеропоніка, способи очищення форсунок, ультразвукова мийна ванна, факторний експеримент.

ЗМІСТ

Вступ.....	6
Розділ 1 Аналіз стану питання.....	10
1.1 Особливості аеропоніки, як одного із провідних напрямків гідропонічних систем.....	10
1.2 Будова і перелік компонентів аеропонних систем.....	14
1.3 Перелік основних технічних проблем у аеропоніці.....	23
Розділ 2 Технологічні особливості систем живлення в аеропоніці.....	33
2.1 Конструкція обладнання для подачі поживного розчину.....	33
2.2 Насосне обладнання та його характеристики.....	34
2.3 Форсунки й системи розпилення.....	38
2.4 Аналіз технічних проблем при подачі аерозолі.....	39
2.5 Рішення для оптимізації роботи системи живлення.....	41
Розділ 3 Методика експериментальних досліджень.....	44
Розділ 4 Опрацювання результатів досліджень.....	50

Розділ 5 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях.....	63
---	----

Список використаних джерел.....	73
---------------------------------	----

ВСТУП

У сучасному аграрному виробництві спостерігається інтенсивний розвиток технологій безґрунтового вирощування рослин, які дозволяють підвищити ефективність використання ресурсів та забезпечити стабільні врожаї незалежно від кліматичних умов. Одним із найперспективніших напрямів цього напрямку є **аеропоніка** – високотехнологічний метод культивування, що базується на живленні рослин через дрібнодисперсний аерозоль живильного розчину. Дана технологія є одним із різновидів гідропоніки, однак має принципову відмінність – коренева система рослин не занурена у воду чи субстрат, а знаходиться у повітряному просторі, де періодично зрошується туманом, утвореним спеціальними форсунками або ультразвуковими генераторами.

У процесі аеропонного вирощування живильний розчин готується із точним балансом усіх складових (азоту, фосфору, калію, кальцію, магнію, заліза, бору тощо), а також контролюється його рН та електропровідність (ЕС). Система розпилення забезпечує створення крапель живильного розчину розміром від 20 до 50 мікрометрів, що дозволяє досягти максимального насичення коренів киснем і значно прискорює процеси засвоєння поживних речовин. А автоматизовані контролери підтримують температуру, вологість та концентрацію CO₂ у замкнутому об'ємі.

За результатами досліджень Systematic Review of Technology in Aeroponics: Introducing the Technology Adoption and Integration in Sustainable Agriculture Model (2023) відомо, ряд переваг аеропоніки над гідропонікою. А саме: вища врожайність на 20–45 % (залежно від культури); споживання добрив – менше на 50–60 %; енергоспоживання – може бути на 10–20 % нижче. Також перевагами такої системи є мінімальне споживання води (до 95% менше, ніж при традиційному землеробстві), відсутність ризику зараження ґрунтовими патогенами, а також можливість вирощування у вертикальних фермах або інших багатоповерхових спорудах. Складність реалізації аеропонних систем зумовлена необхідністю точного керування параметрами

середовища, безперебійного живлення електроенергією та застосування надійних технічних рішень для розпилення і рециркуляції розчину.

Система складається з резервуару для приготування розчину, насосної станції високого тиску (до 6–10 бар), магістральних трубопроводів, системи спеціальних форсунок із тонкою дисперсією або ультразвукових розпилювачів, а також блоку автоматичного керування. Сенсорні модулі вимірюють рН, ЕС, температуру та рівень розчину в реальному часі, передаючи дані до мікроконтролера або ПЛК, який регулює тривалість та частоту циклів зрошення (зазвичай 5–15 секунд кожні 2–5 хвилин). Деякі сучасні системи використовують модулі Wi-Fi або GSM для дистанційного моніторингу, а також LED-освітлення з регульованим спектром для оптимізації фотосинтезу. Завдяки цьому досягається ефективне використання енергоресурсів.

Попри високу технологічну складність, аеропоніка залишається економічно вигідною та екологічно доцільною технологією, що дозволяє отримувати високі врожаї з мінімальними витратами ресурсів. Тому впровадження нових технічних систем автоматизації, енергозбереження та моніторингу параметрів мікроклімату є одним із найважливіших напрямів подальшого вдосконалення аеропонного вирощування рослин.

Мета роботи полягає у дослідженні умов очищення форсунок в аеропонних підприємствах, а також впровадження оптимальних режимів очищення при використанні ультразвукової ванни.

Завдання дослідження:

- Вивчення існуючих технологій очищення форсунок на аеропонних системах.
- Аналіз впливу факторів, при забрудненні і очищенні систем зрошування в аеропоніці.
- Експериментальне дослідження впливу ключових факторів на дослідні зразки форсунок, шляхом проведення трьох серій дослідів із повними факторними експериментами.

Об'єкти дослідження – штучно відтворене забруднення і очищення дослідних зразків, при комбінації факторів для відтворення реальних умов на аеропонних підприємствах.

Предмет дослідження – процес очищення форсунок аеропонної системи та вплив технологічних параметрів ультразвукового очищення (частоти, температури, тривалості, складу середовища) на ефективність видалення забруднень і працездатність розпилювальних елементів.

Методи дослідження. У проведеній роботі використані методи: комплексного аналізу конструкції та умов експлуатації форсунок в аеропонних системах з метою визначення основних чинників забруднення; експериментальні методи дослідження ефективності ультразвукового очищення при різних режимах (температура, тривалість, склад розчину); методи порівняльного аналізу традиційних і інноваційних способів очищення; статистичної обробки експериментальних даних та побудови регресійних залежностей для оцінки впливу параметрів очищення на відновлення працездатності форсунок; факторного експерименту.

Наукова новизна одержаних результатів.

Вперше отримано:

- Система визначення комбінованого впливу визначених факторів на процес забруднення і очищення форсунок аеропонних підприємств.
- експериментальна оцінка значущості кожного із параметрів при відтворенні процесів забруднення при очищенні форсунок при моделюванні умов аеропонної теплиці
- математична модель впливу температури та тривалості очищення в ультразвуковій ванні при технологічних розчинах із різним складом.

Практичне значення одержаних результатів. Практичну цінність становлять результати дослідження процесу очищення форсунок аеропонних систем, що дають змогу обґрунтовано вибрати оптимальні режими ультразвукового очищення (температуру, тривалість і склад розчину) для

ефективного видалення забруднень без пошкодження елементів розпилення, зменшуючи витрати на технічне обслуговування.

1. АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ

1.1 Особливості і переваги аеропоніки, як одного із провідних напрямків гідропонічних систем.

Аеропоніка є однією з найсучасніших і технологічно розвинених форм гідропонного вирощування рослин. Вона ґрунтується на принципі живлення рослин не через ґрунт чи рідке середовище, а за допомогою дрібнодисперсного туману поживного розчину. Це дозволяє забезпечити кореневій системі одночасно доступ до необхідних елементів живлення та великої кількості кисню, що є основною перевагою аеропонних систем над традиційними гідропонними установками.

Як підвид гідропоніки, аеропоніка зберігає головну її ознаку – відсутність ґрунту і подачу поживних речовин у контрольованій водній формі. Проте, на відміну від класичних систем, де корені занурені у розчин або закріплені в інертному субстраті, в аеропоніці вони знаходяться у повітряному просторі. Зрошення здійснюється через спеціальні форсунки, які створюють мікрокраплі розміром 20–50 мікрометрів. Така структура туману сприяє рівномірному розподілу поживних речовин та оптимальному газообміну, що підвищує швидкість росту рослин на 20–30% порівняно з традиційними гідропонними системами.



Рис. 1.1 Теплиця з застосуванням аеропонної системи
вирощування рослин

Живильний розчин для аеропоніки готується з точним балансом макро- та мікроелементів (N, P, K, Ca, Mg, Fe, B тощо). Контролюється його рН (5,5–6,5) і електропровідність ЕС 1,5 – 2,5 мСм/см (мікросименс на сантиметр.), а також параметри мікроклімату – температура, вологість та концентрація CO₂. Для більшості випадків ці показники є в межах: 22–26 °С вдень, 18–22 °С вночі; вологість повітря: 70–90 %; концентрація CO₂: 750–1200 ppm (часто підтримується шляхом подачі CO₂ у замкнених теплицях). У більшості сучасних систем ці показники регулюються автоматично за допомогою сенсорів і мікроконтролерів. Зрошення відбувається імпульсно – кілька секунд подачі туману кожні кілька хвилин, що забезпечує стабільне насичення коренів водою без ризику перезволоження.

До переваг аеропоніки можна також віднести надзвичайну економність використання води – споживання зменшується до 90–95% у порівнянні з традиційним землеробством. Відсутність субстрату знижує ризик розвитку патогенів, а закритий характер системи дозволяє повторно використовувати розчин. Крім того, компактність і вертикальна компоновка у аеропонних теплицях робить можливим вирощування культур у міських умовах або навіть у космічних програмах.

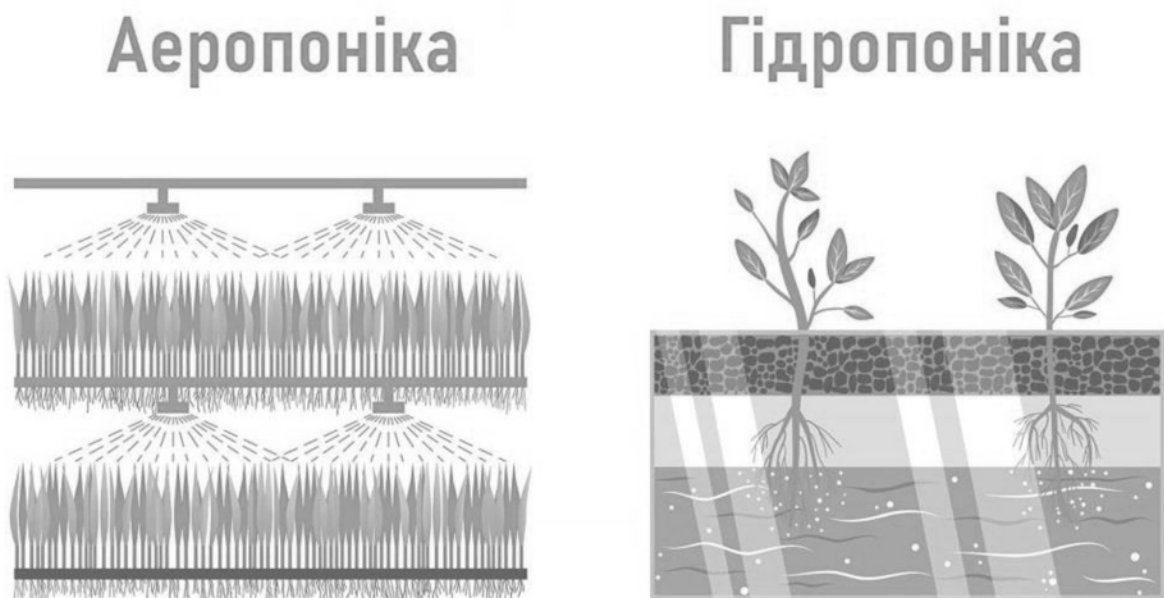


Рис. 1.2 Схематичне порівняння аеропонічного і гідропонічного методу

Аeropоніка вирізняється не лише конструкційними особливостями, а й високим потенціалом інтеграції з сучасними цифровими та енергоощадними технологіями. У новітніх системах активно застосовуються сенсорні мережі, автоматизовані контролери, системи штучного інтелекту та Інтернет речей (Internet of Things), що забезпечують постійний моніторинг і корекцію параметрів живлення, вологості, температури та газового складу повітря. Така інтеграція дозволяє створювати повністю автономні теплиці з мінімальним втручанням людини. Важливою перевагою aeropонних систем є можливість тонкого налаштування живлення залежно від стадії розвитку рослини. За допомогою програмованих контролерів можна змінювати концентрацію мікроелементів і ритм зрошення, що підвищує якість урожаю та скорочує вегетаційний період. Це робить aeropоніку особливо ефективною для вирощування високорентабельних культур – салатів, базиліку, полуниці, а також розсади овочів і квітів.

Крім того, aeropоніка має важливе екологічне значення: відсутність ґрунту усуває проблему ерозії, а замкнутий цикл розчину запобігає потраплянню нітратів у довкілля. Використання очищеної води та контрольованих поживних сумішей мінімізує вплив людського фактора і практично усуває втрати ресурсів. Ще однією особливістю є можливість вертикальної та модульної компоновки систем, що забезпечує надзвичайно високу щільність посадки при малій займаній площі. Це відкриває перспективи для створення вертикальних теплиць у міських умовах, на дахах будівель чи у промислових приміщеннях. Перспективним напрямком розвитку є також використання aeropоніки у наукових та космічних дослідженнях. Завдяки контрольованому середовищу і можливості роботи в умовах мікрогравітації цей метод активно розглядається NASA та ESA як основа для майбутніх систем забезпечення рослинного харчування в тривалих космічних місіях. Також варто згадати, що aeropонічні установки споживають у середньому на 90–95% менше води, ніж традиційні ґрунтові системи, що особливо важливо для регіонів із дефіцитом прісної води. Деякі

Туманоутворювачі високого тиску здатні працювати при витраті всього 5–12 Вт на один модуль, що забезпечує стабільний режим розпилення. Завдяки можливості побудови теплиці із секціями у вертикальній компоновці щільність розміщення рослин може зростати у 4–10 разів порівняно зі звичайними теплицями. У промислових комплексах сучасні системи управління дають можливість знизити кількість обслуговуючого персоналу до 1 оператора на 500–800 рослин, не втрачаючи якості моніторингу, одним із найперспективніших напрямків сучасного аграрного виробництва. Якщо розглядати сучасні рішення – рівень засвоєння поживних речовин досягає до 95%, що перевищує показники традиційної гідропоніки на 15–20%. Завдяки оптимізованому мікроклімату врожайність зелених культур, таких як салати чи шпинат, може зростати у 2–3 рази, а цикл вирощування скорочується до 18–25 діб залежно від сорту. Для високорентабельних культур – наприклад, базилику – модернізовані системи з освітленням повного спектру забезпечують приріст біомаси на 30–40% при тих самих енерговитратах.

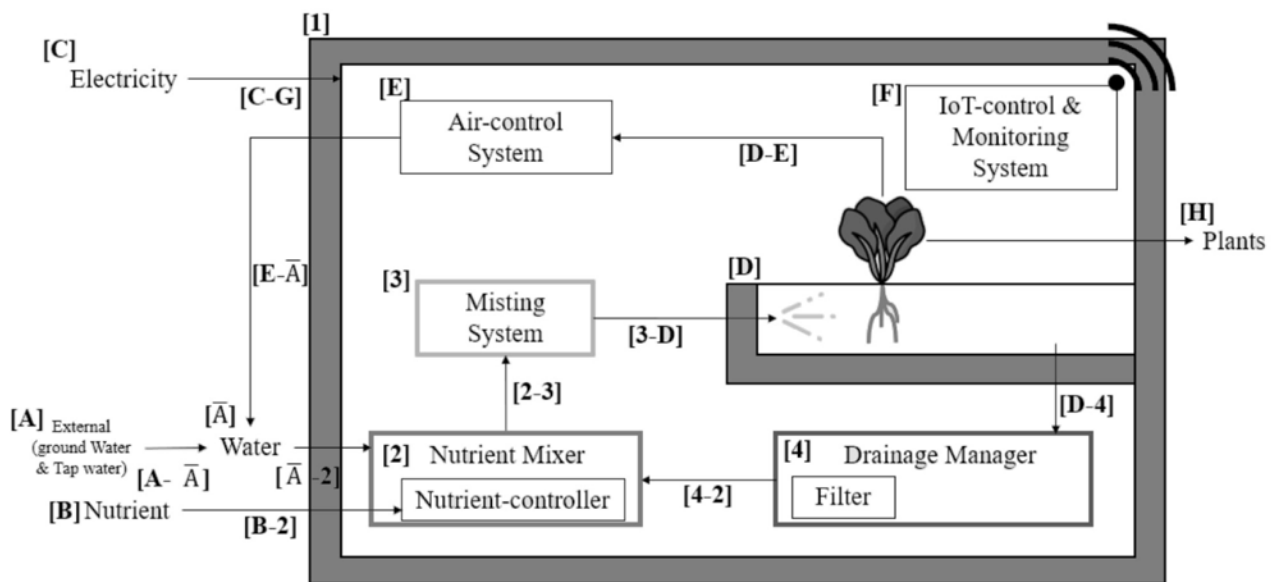


Рис. 1.2 Схематичне зображення ключових компонентів та рух основних ресурсів у межах замкнутої системи обприскування.

Отже, аеропоніка – це не просто одна з форм гідропоніки, а комплексна високотехнологічна платформа, що відрізняється повітряним середовищем для коренів, дрібнодисперсним зрошенням та високим ступенем автоматизації. Вона поєднує агрономію, мехатроніку,

біотехнологію та інформаційні системи, спрямована на створення максимально ефективного, екологічного й стійкого до зовнішніх факторів агровиробництва.

1.2 Будова і перелік компонентів аеропонних систем.

Аеропонна система складається з таких основних вузлів:

1) Резервуар для живильного розчину. Це герметична ємність, зазвичай виготовлена з харчового пластику або нержавіючої сталі, об'ємом від 20 до 200 літрів (у промислових системах – до 1000 л). У резервуарі готується водний розчин макро - та мікроелементів, підтримується стабільна температура у межах 20–24 °С за допомогою нагрівального елемента з термореле. та проводиться аерація для запобігання застою рідини. Усередині встановлено мішалку або циркуляційний насос, що запобігає осіданню солей. Дно резервуара має нахил 3–5° для повного зливу рідини.



Рис.2.1 Зразок резервуара для зберігання живильного розчину у гідропонічних і аеропонічних теплицях.

2) Насосна станція високого або низького тиску. Аеропоніка високого тиску (High Pressure Aeroponics) використовує насоси низької подачі / високого тиску для створення тиску в системі. Це сприяє утворенню крапель живильного розчину розміром 25–60 мікрон і забезпечує подачу розчину до форсунок під тиском 0,5–0,9 МПа. або 0,1–0,3 МПа (для

пневматичних). Аеропоніка низького тиску (Low Pressure Aeroponics) використовує насоси високої подачі / низького тиску для розпилення живильного розчину на кореневу систему. Така система забезпечує постійне зволоження коренів і зазвичай працює в режимі рециркуляції розчину. В обох моделях застосовуються ставкові (pond-type), мембранні або плунжерні насоси з нержавіючої сталі чи хімічно стійких полімерів, які підтримують електронне керування, що дозволяють точно регулювати цикли зрошення (5–15 секунд подачі кожні 2–5 хвилин). На виході насоса розташований зворотний клапан і регулятор тиску, який забезпечує стабільність подачі незалежно від кількості активних форсунок.



Рис.2.2 Зразки насосів для подачі розчину у аеропонних системах

1 – Насос високого тиску від фірми Aquatic моделі 8800. 2 – Занурювальний насос від фірми Ecoplus.

3) Система розпилення є ключовим елементом аеропонної установки, оскільки саме вона забезпечує рівномірне покриття кореневої поверхні туманом, що містить поживні елементи. Для формування мікрокрапель застосовуються високотискові форсунки або ультразвукові генератори, здатні створювати дисперсний аерозоль із розміром крапель у межах 20–50 мікрометрів. Такий розмір дозволяє туману рівномірно покривати кореневу поверхню без надмірного зволоження, забезпечує достатню площу змочування коренів без їхнього перезволоження, а також оптимальне насичення киснем. Форсунки виготовляються з кераміки або нержавіючої сталі, оскільки звичайні пластикові елементи швидко забиваються мінеральними солями. У високотискових системах (High

Pressure Aeroponics) використовується насос, який створює тиск 0,5–0,8 МПа, що дозволяє стабільно підтримувати дисперсію туману. У низькотискових системах (Low Pressure Aeroponics) тиск становить 0,2–0,3 МПа, проте при цьому розмір крапель збільшується до 50–80 мкм, що знижує ефективність аерації, тому такі системи зазвичай застосовують для менш вибагливих культур. Форсунки виготовляються з кераміки або нержавіючої сталі (AISI 316L), оскільки саме ці матеріали стійкі до корозії та не забиваються мінеральними відкладеннями за малий проміжок часу. Діаметр сопел зазвичай 0,2–0,3 мм становить, а кут розпилення 30–45° – що забезпечує рівномірне покриття кореневої зони в камері. Для 30–45°, одного модуля об'ємом 0,2–0,3 м³ зазвичай використовується 4–12 форсунок, продуктивність кожної з яких складає 0,05–0,15 л/хв при робочому тиску 0,6 МПа. Як альтернатива використовують ультразвукові генератори туману. Вони працюють на частоті 1,7–2,4 МГц утворюючи хмару крапель діаметром близько 20–25 мкм при енергоспоживанні 25–40 Вт та продуктивності 400–800 мл/год на одну мембрану. Такі генератори особливо ефективні у невеликих установках і забезпечують високу однорідність туману без використання насосів високого тиску.

4) Система збору та рециркуляції живильного розчину є важливою частиною аеропонної установки, оскільки забезпечує повторне використання вологи, що осідає після циклів розпилення, та мінімізує витрати води і добрив. Вона збирає надлишкову вологу з камери вирощування та повертає її у фільтрований резервуар. Це знижує витрати води і добрив до 95 %. У зливній частині встановлений сітчастий фільтр для уловлювання частинок субстрату або корневих залишків, що значно зменшує експлуатаційні витрати та навантаження на систему підготовки води. Конструктивно система складається з нахиленого піддону або жолоба під камерою вирощування, який має кут нахилу 2–5° для самоплинного відведення надлишкової рідини. Зібраний конденсат та краплі подаються через зливний патрубок Ø 20–25 мм до фільтраційного модуля. На вході у зливній частині

встановлено сітчастий фільтр із нержавіючої сталі з пористістю 200–300 мкм, який затримує частинки субстрату, залишки коренів та інші тверді домішки. Контроль рівня рідини здійснюється ультразвуковими або поплавковими сенсорами, що працюють у діапазоні 0–50 см з точністю 2 мм. Коли рівень розчину опускається нижче допустимого, система автоматично подає сигнал на дозаправку чистою водою з магістралі або додавання концентрату. Для запобігання розвитку патогенної мікрофлори розчин періодично знезаражується за допомогою ультрафіолетового стерилізатора ($\lambda = 254$ нм) або озонатора з продуктивністю 100–300 мг/год

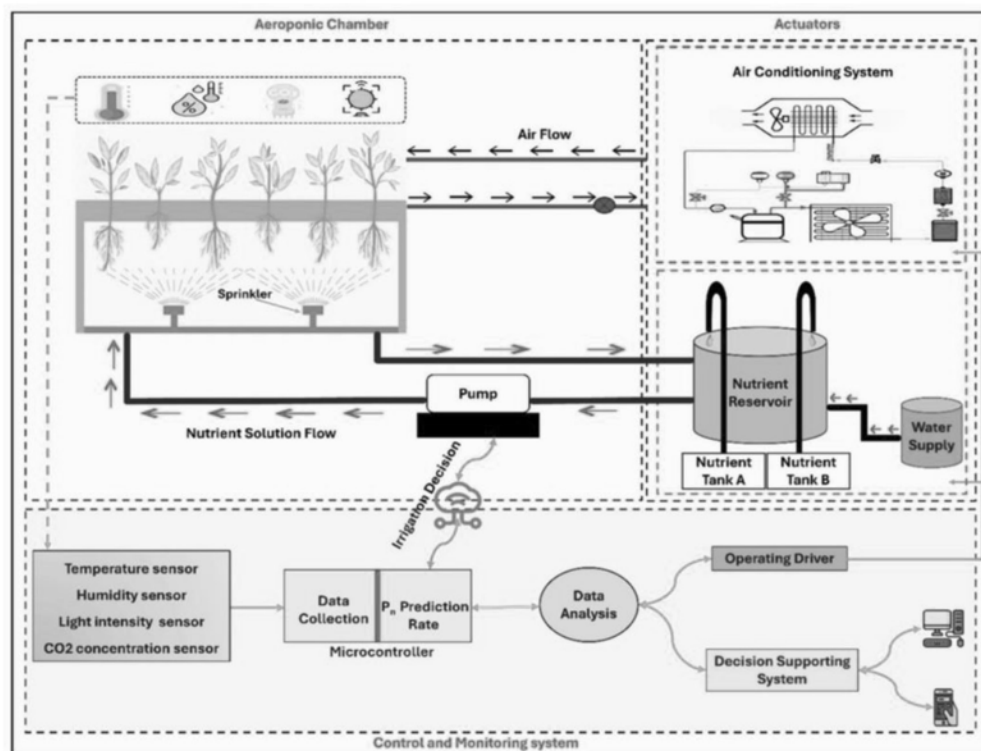


Рис.2.3 Принцип роботи рециркуляційної системи в аеропонному вирощуванні рослин.

Системи рециркуляції також передбачають використання циркуляційного насоса з продуктивністю 6–15 л/хв, що забезпечує постійне перемішування живильного розчину та запобігає його стратифікації. Для стабілізації рН у діапазоні 5.2–6.0 використовується автоматичний дозатор кислотно-лужних коректорів із точністю подачі ± 0.1 мл на цикл. Температура розчину підтримується в межах 18–22 °C за допомогою компактних теплообмінників, що пов'язані із системою терморегуляції в

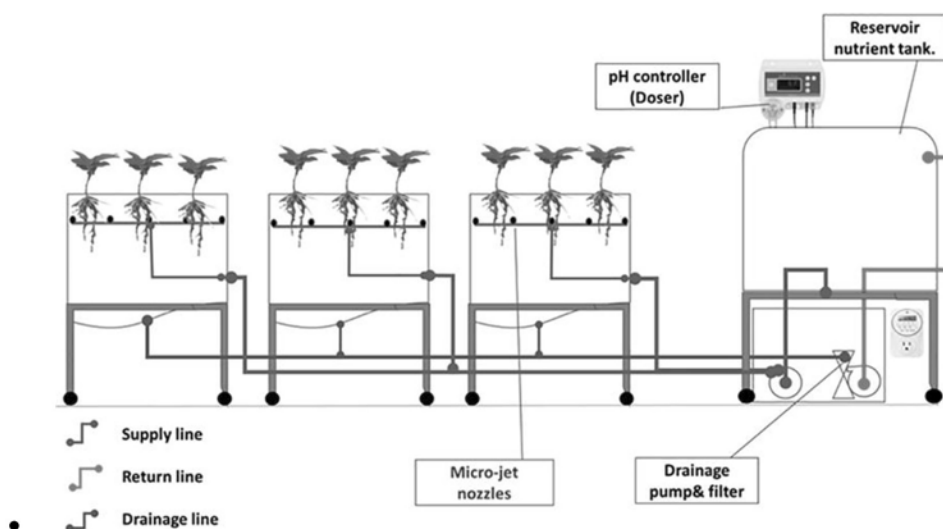
теплиці, що запобігає перегріву кореневої зони в літній період. У системах із тривалим циклом роботи передбачено заміну частини розчину на 10–20% об'єму кожні 7–10 днів для підтримання хімічної стабільності. У великих підприємствах контроль роботи всіх елементів рециркуляції інтегрується в центральний контролер, який веде легування (записування в пам'ять) параметрів кожні 10–30 секунд, дозволяючи оперативно відстежувати відхилення та запобігати аварійним ситуаціям.

Таблиця 2.1 – Технічні характеристики фільтраційно-дозувального блока аеропонної системи

Параметр	Позначення / Одиниця вимірювання	Типові значення / Діапазон	Примітка
Ступені фільтрації	–	2 (груба та тонка)	Механічна + поліпропіленова
Пористість фільтрів	μm	100–50 (груба), 10 (тонка)	Запобігає забиванню форсунок
Діаметр сопел розпилювачів	mm	0,2–0,5	Високодисперсне розпилення
Продуктивність насоса	L/min	2–10	Залежно від об'єму системи
Робочий тиск у контурі	MPa	0,3–0,6	Для стабільної подачі туману
Тип дозуючих насосів	–	Мембранні або перистальтичні	Керування мікроконтролером
Точність дозування	%	±1–2	Для стабільної концентрації
Діапазон вимірювання ЕС	mS/cm	0–5	Датчики з цифровою компенсацією температури
Робочий рівень ЕС	mS/cm	1,6–2,2	Оптимальний для більшості культур
Діапазон вимірювання рН	–	4,0–8,0	Електроди скляного типу
Робочий рівень рН	–	5,5–6,5	Баланс засвоюваності

			елементів
Тип контролера	–	Arduino / ESP32 / PLC	Програмне керування дозуванням
Режим зрошення	–	Імпульсний: 5–15 с подачі / 3–10 хв пауза	Для запобігання перезволоженню
Температура робочого середовища	°C	18–26	Оптимум для більшості культур
Енергоспоживання блока	W	25–60	Залежить від типу насосів

5) Магістраль виконується з поліуретанових або ПВХ труб діаметром 6–10 мм, стійких до добрив і ультрафіолету. Для обслуговування застосовуються швидкороз’ємні з’єднання типу “quick connect”. Трубопровід розгалужується по секціях, що дозволяє керувати групами рослин окремо. Трубопровідна мережа виготовляється з поліаміду або ПВХ діаметром 6–8 мм, здатного витримувати тиск до 1 МПа. На виході з магістралі встановлюються зворотні клапани, розраховані на 0,2 МПа, що запобігають капанню після припинення подачі тиску. Для контролю параметрів подачі використовуються датчики тиску з діапазоном 0–1 МПа, сенсори витрати (0,3–6 л/хв), а також ультразвукові датчики рівня розчину у резервуарі.



• Рис.2.4 Схема магістралі подачі живильного розчину.

Зазвичай магістраль подачі в аеропонних системах доповнюється вузлами стабілізації тиску та контролю потоку, які забезпечують рівномірну роботу форсунок навіть при зміні навантаження. Для зменшення пульсацій у

системах високого тиску (0,4–0,8 МПа) застосовуються демпферні камери об'ємом 50–150 мл, які вирівнюють імпульси, створювані мембранними насосами. У більш розгалужених системах використовують колектори з 4–12 виходами, що дозволяють рівномірно розподіляти розчин між секціями та уникати падіння тиску на периферійних форсунках. У місцях поворотів і розгалужень трубопроводу встановлюють армовані кутові фітинги (90° або 45°), що витримують до 1,2 МПа та не обламуються під дією циклічних навантажень. Для контролю стабільності подачі на кожен секцію монтується міні-манометр (діапазон 0–0,6 МПа) або електронний сенсор, який передає дані на контролер. Це дозволяє автоматично відстежувати засмічення форсунок: падіння тиску на 0,05–0,1 МПа свідчить про часткове забивання. Для великих установок (>200 форсунок) подача організовується у вигляді замкнутого кільця діаметром 10–12 мм, що мінімізує втрати тиску на віддалених ділянках та забезпечує різницю тиску не більше ніж 0,02 МПа між початком і кінцем контуру. Така конфігурація дозволяє підтримувати однорідний режим розпилення навіть при значних навантаженнях системи. Також у систему додають запобіжні клапани, налаштовані на 0,9–1,0 МПа, які гарантують безпечну роботу при можливих гідравлічних ударах. Для зручності обслуговування магістраль поділяють на сегменти за допомогою сервісних кранів діаметром 6–8 мм, що дозволяє відключати окремі ділянки при промиванні чи заміні обладнання. Дуже часто в промислових системах у магістраль вбудовують датчики температури (діапазон 0–60 °С, точність $\pm 0,2$ °С), оскільки перегрітий розчин (>28 °С) прискорює бактеріальний ріст у трубах.



Рис.2.5 Частина магістралі подачі виконана із ПВХ труб.

6) Камера вирощування. Являє собою вирощування в аеропонній системі являє собою герметизований модуль, усередині якого коренева зона підтримується в стабільному туманному середовищі. Її виготовляють із поліпропілену або ABS-пластику товщиною 3–5 мм, що забезпечує термоізоляцію та захист від ультрафіолету. Об'єм камери зазвичай становить 20–80 л на секцію, а внутрішня висота 35–60 см дає змогу кореням розвиватися без обмежень. Стіни камери мають вбудовані відбивачі світла або покриття з коефіцієнтом відбиття 80–90 %, що зменшує перегрів і стабілізує мікроклімат. У дні або бокових панелях розташовуються посадкові отвори діаметром 40–60 мм із неопреновими вставками, які фіксують рослини й не пропускають світло до коренів. Температура усередині камери підтримується в межах 18–24 °C за рахунок вентиляційних каналів та ізоляції, а відносна вологість тримається на рівні 90–100 % завдяки періодичному розпиленню. Конструкції камера забезпечує оптимальне середовище для аеропонного вирощування: максимальну аерацію, рівномірне зволоження коренів та мінімальні втрати води й поживних речовин.

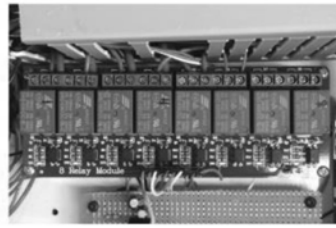


Рис.2.6 Зразок камери вирощування.

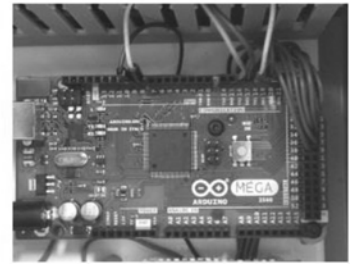
7) Електронна система керування. Включає датчики рН, ЕС, температури, вологості та рівня води, а також мікроконтролер (Arduino, ESP32 або STM32), або ПЛК, який керує насосом, зрошенням, освітленням і вентиляцією. Сучасні системи оснащені Wi-Fi або GSM-модулями для дистанційного моніторингу через комп'ютер. 7. Електронна система керування побудована на базі мікроконтролера що здійснює імпульсне керування насосом і форсунками. Програмується тривалість циклів (наприклад, 10 с подачі – 2 хв паузи). На панелі керування відображаються параметри: температура, рН, ЕС, рівень розчину, тиск у системі. У сучасних промислових установках до системи додають модулі дистанційного моніторингу IoT, які через Wi-Fi або GSM передають дані на сервер для аналізу стану рослин та оптимізації циклів живлення.



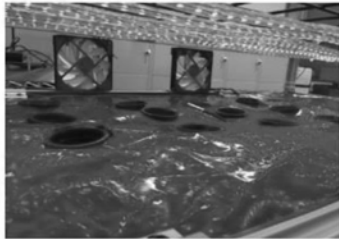
Plumbing & HMI



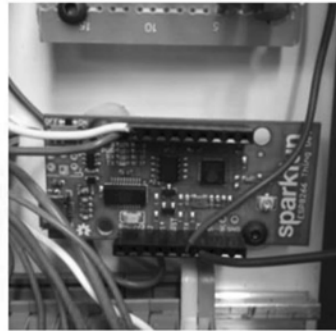
Relay Board



Microcontroller



LEDs



WiFi Module



Plant

Рис.2.7 Елементи системи керування і вузлів в аеропоніці.

1.3 Перелік основних технічних проблем та їх вирішення у аеропоніці.

Як було згадано, аеропоніка представляє собою інноваційний метод вирощування рослин, де коренева система перебуває у повітряному середовищі і періодично зволожується поживним розчином у вигляді дрібнодисперсного аерозолю. І хоч цей метод демонструє значні результати, зокрема економію води до 95% порівняно з традиційним землеробством та прискорення росту рослин на 25-35%, за цими перевагами стоїть складна технічна система, яка має ряд критичних проблем, що значно ускладнюють широке впровадження аеропоніки у комерційне виробництво.

До основних технічних проблем належить:

1) Проблеми системи розпилення та форсунок:

Форсунки, які створюють туман з оптимальним для аеропонії розміром крапель від 5 до 50 мікрметрів, мають надзвичайно малі, майже мікроскопічні отвори діаметром всього від 0.1 до 0.5 міліметра. Ці отвори легко забиваються в процесі експлуатації. А саме, їх забивають мінеральні солі, органічні частинки та стійка біоплівка, що утворюється внаслідок активної життєдіяльності мікроорганізмів у поживному розчині. Дослідження

показують наступне: при використанні води з підвищеною жорсткістю, понад 150 ppm, критичне засмічення, яке повністю порушує роботу системи, настає вже через 48-72 години безперервної роботи. Наслідки засмічення форсунок є серйозними, і призводять до того, що продуктивність системи може різко знизитися до 40% всього лише за тиждень експлуатації. Це призводить до небезпечних явищ: нерівномірного розподілу поживних речовин по кореневій зоні, утворення так званих "сухих зон", де корені, не отримуючи вологи та живлення, починають відмирати. Через засміченість форсунки також можуть збільшувати розмір крапель з оптимальних 30 мікрометрів до великих 80-100 мікрометрів, що суттєво погіршує засвоєння поживних речовин кореневою системою рослин. Для боротьби з цією поширеною проблемою використовуються фільтри тонкого очищення з розміром пор всього 5-10 мікрометрів. Також проводиться ретельна щоденна промивка всієї системи спеціально підкисленою водою з низьким рН на рівні 4.0-4.5. Найсучасніші установки переходять на ультразвукові форсунки, які, на відміну від традиційних механічних, значно менш схильні до засмічення і можуть створювати розмір крапель із дуже малими значеннями – від 5 до 25 мікрометрів. Додатково, природний механічний знос форсунок поступово збільшує розмір крапель на 10-30% всього за місяць експлуатації.



Рис.3.1 Робота засміченої форсунки в аеропоніці

2) Управління вологістю кореневої зони:

Підтримка оптимальної вологості в кореневій зоні відноситься до найпоширеніших проблем. На відміну від ґрунтового вирощування, де ґрунт виконує роль буфера вологи, в аеропоніці корені знаходяться у повітрі і не мають такого захисту. Оптимальна вологість кореневої зони має становити 75-95%. Щоб уникнути проблеми система працює циклами: розпилення триває 3-15 секунд, після чого система вимикається на 3-5 хвилин. Будь-яке порушення цього балансу має серйозні наслідки на розвиток рослин. При перезволоженні, коли вологість перевищує 95-99%, у кореневій зоні створюються анаеробні умови, тобто умови без доступу кисню. Це призводить до розвитку корневих гнилей, спричинених патогенними грибами роду *Pythium* та *Phytophthora*. З іншого боку, при недостатній вологості, нижче 70%, дрібні кореневі волоски, які відповідають за поглинання води та поживних речовин, починають висихати вже через 5-10 хвилин. Конкретний приклад: у томатів при зниженні вологості до 65% протягом всього 15 хвилин відбувається незворотне пошкодження корневих волосків, що в підсумку знижує врожайність на 12-18%. Додатковою проблемою є нерівномірність розподілу вологості – в різних зонах однієї камери різниця може сягати 25%, що означає, що частина рослин перебуває в оптимальних умовах, а частина – страждає від стресу. Ця проблема пов'язана з повною залежністю від автоматизації. Аеропонічна система не може функціонувати вручну – вона потребує постійної автоматизованої роботи таймерів, датчиків та контролерів. Відмова таймера призводить до висихання коренів за 10-15 хвилин влітку або за 20-30 хвилин взимку. Збій живлення на 30-60 хвилин може призвести до 100% втрати врожаю. Тому комерційні аеропонні підприємства інвестують в резервні системи живлення, дублювання насосів та аварійні системи сповіщення, що значно збільшує початкову вартість проекту.

3) Контроль поживного розчину і система аналізу стану повітря:

Ще одною великою технічною проблемою є підтримка стабільного складу поживного розчину. В аеропоніці розчин циркулює по замкненій

системі, проходячи через повітря навколо рослин, і його параметри постійно змінюються. Дані з сенсорів надходять до програмованого контролера, який автоматично коригує концентрацію мінеральних елементів і склад розчину відповідно до фаз розвитку рослин. Система аналізу повітря включає датчики температури, відносної вологості та концентрації CO_2 , що дозволяє підтримувати стабільний мікроклімат у камері вирощування. Найважливішим параметром поживного розчину є електропровідність або ЕС, яка вимірює концентрацію солей у розчині та дрейф рН. Оптимальні значення становлять 1.5-2.5 mS/cm для більшості культур. Проблема полягає в тому, що різні елементи поглинаються рослинами з різною швидкістю. Наприклад, азот та калій поглинаються швидше, ніж кальцій та магній. Це призводить до дисбалансу поживних речовин, навіть якщо загальна ЕС залишається у нормі. Через 3-5 днів роботи в розчині може накопичитися надлишок кальцію на 30-40%, тоді як азоту може бракувати 15-20%. Оптимальний рН для більшості культур становить 5.4-6.6. У процесі поглинання поживних речовин рослини виділяють іони водню або гідроксид-іони, що змінює рН розчину, а типова швидкість зміни становить 0.2-0.5 одиниць рН на добу. Це означає, що без автоматичної корекції розчин швидко виходить за межі оптимального діапазону. При рН нижче 5.0 зростає доступність заліза та марганцю до токсичних рівнів, а при рН вище 7.0 багато мікроелементів, особливо залізо, випадають в осад і стають недоступними для рослин.



Рис.3.2 Система зрошування із системою контролю вологості і температури в теплиці.

4) Вплив Мікробіологічних проблем:

Великою групою проблем є контроль мікробіологічного стану системи, адже тепле, вологе середовище з багатим поживним розчином є ідеальним місцем для розвитку як корисних, так і патогенних мікроорганізмів. Найнебезпечнішими патогенами в аеропоніці є водяні цвілі роду *Pythium*, особливо *Pythium aphanidermatum*. Ці організми можуть колонізувати всю систему за 24-48 годин при температурі вище 25°C, при цьому інфіковані рослини показують побуріння коренів, їхнє розм'якшення та відмирання. Втрати врожаю при спалаху можуть сягати 70-100%, якщо не вжити термінових заходів. Ще однією загрозою є утворення біоплівки на поверхні труб, форсунок та резервуарів. Біоплівка являє собою складну структуру з бактерій, грибів та їхніх метаболітів, захищену полісахаридною матрицею. Вона формується за 5-7 днів навіть в чистих системах. Біоплівка товщиною всього 0.6-1 мм знижує ефективність форсунок на 20-30% та створює резервуар патогенів, які постійно потрапляють у розчин і спричиняють її подальше утворення. Для боротьби з цими проблемами використовуються різні методи стерилізації. Ультрафіолетове опромінення з дозою 30-60 мДж/см² знищує 99% бактерій та вірусів, але неефективне проти спор грибів. Озонування дозою 0.1-0.3 ppm є більш ефективним, але вимагає точного контролю, оскільки концентрація вище 0.5 ppm токсична для коренів. Перекис водню у концентрації 50-100 ppm є найбільш доступним методом, але потребує щоденного додавання через швидке розкладання.

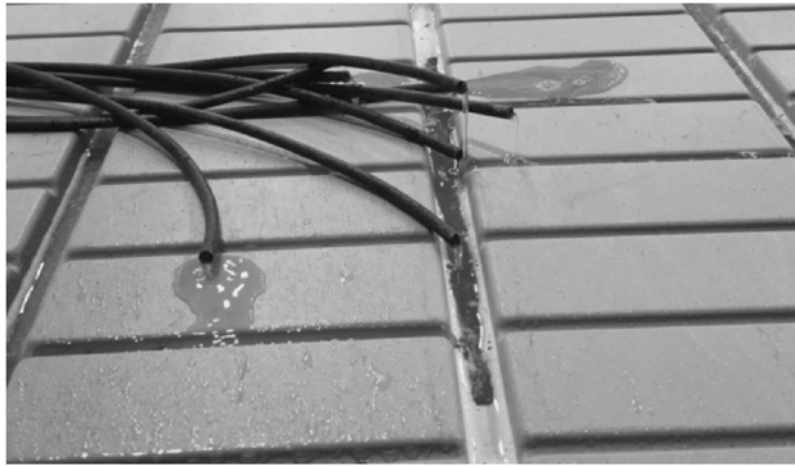


Рис.3.3 Наслідки біологічного засмічення трубопроводу в системі зрошування

5) Енергетична залежність:

Критичною проблемою є висока енергетична залежність аеропонічних систем, адже на відміну від традиційного землеробства, аеропоніка потребує постійного електропостачання для роботи насосів, компресорів, систем освітлення, вентиляції та контролю клімату. Враховуючи що високоефективні насоси для підтримки тиску 80-120 PSI споживають 1.5-3 кВт на 100 м² вирощувальної площі а системи освітлення, особливо LED-світильники промислового класу, споживають 200-400 Вт на м² споживання енергії є дуже великим. Також важливими є Системи охолодження та опалення. Вони додають ще 100-200 Вт на м². В сумі типова комерційна аеропонічна теплиця площею 1000 м² споживає 50-80 кВт електроенергії під час пікового навантаження. Це створює подвійну проблему: по-перше, високі операційні витрати на електроенергію, які можуть становити 30-40% від загальних витрат виробництва; по-друге, критичну залежність від стабільності електропостачання. У регіонах з нестабільним електропостаченням це робить аеропоніку практично нереалізовною без значних інвестицій у резервні генератори та системи безперебійного живлення.

6) Проблеми масштабування:

До найбільших проблем в аеропонічному вирощуванні рослин належить складність масштабування. Так, збільшення аеропонічних систем від лабораторних або домашніх установок до комерційного виробництва є

надзвичайно складною задачею, і потребують багато технічних рішень, адже технології і розрахунки для систем які працюють на площі 10-20 м², не працюють на площі 1000+ м². При збільшенні розміру системи виникає проблема нерівномірності тиску. У великих системах довжина трубопроводів може сягати сотень метрів, що призводить до падіння тиску від початку до кінця системи на 15-30 PSI. Це означає, що форсунки на початку системи працюють з тиском 120 PSI і створюють дрібнодисперсний туман, а форсунки в кінці системи працюють з тиском 90 PSI і створюють більші краплі, що призводить до нерівномірності зволоження. Так само зростає складність обслуговування великих систем. Якщо в маленькій системі оператор може перевірити кожен форсунку щодня, то у системі з 1000+ форсунками це стає практично неможливим без автоматизованих систем діагностики, для встановлення яких необхідні значні інвестиції. Економіка масштабу також працює не завжди на користь аеропоніки. Початкові інвестиції у комерційну аеропонічну теплицю становлять 500-1000 доларів на м² порівняно з 100-300 доларами на м² для гідропонічних систем. Час окупності проекту може сягати 4-7 років, що є значним бар'єром для комерційного впровадження. Існують серйозні проблеми масштабування до комерційного рівня виробництва, які часто недооцінюються при плануванні проектів. Синхронізація роботи тисяч форсунок на площі понад 1000 м² стає ключовою інженерною задачею, оскільки різниця тиску між початком та кінцем трубопроводу може сягати 20-35 PSI при довжині магістралі 50-100 метрів, що призводить до нерівномірності розпилення.

1.4 Висновки до розділу 1.

Аеропоніка має величезний потенціал для трансформації і вдосконалення сучасного сільського господарства. Ця технологія здатна революціонізувати витрату ресурсів і сприяти продовольчому виробництві, особливо в регіонах з значною нестачею водних ресурсів, де втрати води можуть сягати 90-98% при традиційному поливі внаслідок випаровування, поверхневий стік та глибинну фільтрацію. За оцінками ООН, до 2050 року

потреба у прісній воді для сільського господарства зросте на 55%, що робить технології зберігання води критично важливими. Аеропоніка також є відповіддю на проблему обмеженості родючих сільськогосподарських земель, площа яких зменшується щорічно на 5-10 мільйонів гектарів через деградацію родючого шару та опустелювання, причому найбільші втрати спостерігаються у найбільш населених регіонах Азії та Африки.

Враховуючи, що аеропонні системи дозволяють отримувати врожаї салату 15-20 разів на рік порівняно з 3-4 разами у відкритому ґрунті, скорочуючи цикл вирощування з 40-50 днів до 25-28 днів, технологія є надзвичайно ефективною. Як приклад, для томатів продуктивність може досягати 55-80 кг/м² на рік у багаторусних установках проти 8-12 кг/м² у традиційних теплицях. А вирощування насіння картоплі що, виробляються в аеропонних системах з коефіцієнтом розмноження 1:30-1:50 за сезон порівняно з 1:8-1:10 у польових умовах, значно прискорює селекційні програми.

Однак за цими збільшеними показниками стоїть надзвичайно складна технічна система. Аеропоніка є надзвичайно чутливою до технічних збоїв, і є найскладнішою в обслуговуванні серед усіх методів безґрунтового вирощування. Система вимагає постійного моніторингу параметрів середовища щонайменше кожні 10-25 хвилин, оскільки коренева система, що знаходиться у повітрі, не має буферної ємності, характерної для ґрунту або субстрату. Відмова обладнання навіть на 20-30 хвилин влітку може призвести до незворотного пошкодження корневих волосків та втрати від 15-25% загальної продуктивності рослин.

Для успішної експлуатації аеропонічних систем необхідний високий рівень технічної експертизи персоналу. За даними досліджень голландського Університету Вагенінгена, період навчання оператора до досягнення професійної компетенції становить 6-12 місяців інтенсивної практики, що значно перевищує 2-3 місяці для класичних гідропонічних систем.

До технічних викликів також додаються мікробіологічні ризики та їх наслідки. Тепле вологе середовище з температурою 20-25°C та вологістю

близькою до 100% є ідеальним для швидкого розмноження патогенів. Як приклад ооміцети роду *Pythium*, що можуть подвоїти свою популяцію кожні 4-6 годин при оптимальних умовах. Втрати врожаю при масштабному спалаху можуть досягати 70-100%. Це вимагає регулярного застосування профілактичних заходів: УФ-стерилізації розчину, або додавання перекису водню у концентрації 50-100 ppm, що має окислювальну дію.

Система має високу енергетичну залежність. Це створює як економічні, так і технічні проблеми для систем контролю середовища, включаючи опалення, охолодження, вентиляцію та осушення. Споживання електроенергії може досягати 3-5 кВт на 100 м² залежно від сезону та кліматичних умов, враховуючи й LED-освітлення з фотосинтетичною активною радіацією 200-400 мкмоль/м²/с.

Подолання цих численних технічних викликів вимагає комплексного та системного підходу, що охоплює як постійне вдосконалення технічних систем так і ефективні організаційні рішення.

Експлуатація технічного обладнання при аналізі точок відмов. Перехід на ультразвукові форсунки з п'єзокерамічними елементами, які генерують туман без механічних отворів. Впровадження більш ефективних насосів змінної частоти зі зворотним зв'язком за тиском знижує споживання енергії на 20-40% порівняно з традиційними насосами сталого тиску. Використання керамічних мембранних фільтрів з розміром пор 0.1-0.2 мкм замість стандартних 5-10. Це все вимагає вищих початкових інвестицій, що робить час окупності теплиці значно більших порівняно із звичайними теплицями. Також, критично важливим є систематичне накопичення досвіду і впровадження готових дієвих рішень через створення баз даних культиваційних протоколів, подібно до баз знань, що використовуються в точному землеробстві із використанням методів аналізу в комп'ютерних системах.. Ці бази зберігають в собі оптимізовані значення кількості і вибір поживних розчинів для кожної культури на різних стадіях розвитку. Обмін такими даними між операторами

через галузеві платформи може прискорити процес оптимізації на 50-70% та знизити ризики при запуску нових проектів.

Тільки такий комплексний підхід, що інтегрує технічні інновації, автоматизацію, накопичення знань та професійну підготовку персоналу, дозволить аеропоніці реалізувати свій теоретичний потенціал продуктивності, що в 30-50 разів перевищує традиційне ґрунтове землеробство за річним циклом при вертикальному і багаторярусному розміщенні. Це відкриє шлях до трансформації аеропоніки з експериментальної технології у реальну альтернативу для великомасштабного комерційного виробництва овочів, зелені та ягід у міських вертикальних фермах та регіонах з екстремальними кліматичними умовами, де традиційне землеробство неможливе або неефективне.

2. ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ СИСТЕМ ЖИВЛЕННЯ В АЕРОПОНІЦІ.

2.1 Конструкція обладнання для подачі поживного розчину:

Система подачі поживного розчину в аеропоніці є гідравлічним контуром замкненої дії, що забезпечує періодичне розпилення розчину в зоні кореневої системи рослин. Основними елементами є резервуар, насосний вузол, магістралі подачі, форсунки та система керування. Резервуар для поживного розчину виготовляється з хімічно стійкого поліетилену або поліпропілену різного об'єму. Для невеликих комплексів зазвичай 20–80 л. У ньому розміщується розчин із електропровідністю 1,2–2,5 мС/см та рН 5,5–6,5. Для запобігання осадженню солей зазвичай застосовується циркуляційне перемішування або зворотна лінія. Подача поживного розчину здійснюється за допомогою насоса тиском 3–7 бар і продуктивністю 1–5 л/хв. Насос працює в імпульсному режимі, з тривалістю циклу розпилення 5–15 с та паузами 2–10 хв, що забезпечує високу аерацію коренів. Магістралі виконуються з ПВХ або поліуретанових трубок діаметром 5–10 мм, стійких до корозії. З'єднання – швидкокороз'ємні фітинги. Це дозволяє при потребі провести оперативне обслуговування та заміну елементів. Ключовим елементом є форсунки високого тиску. Їх вихідний отвір має діаметр 0,1–0,3 мм, що дозволяє формувати аерозоль із розміром крапель 30–80 мкм. Саме такий розмір крапель забезпечує максимальну площу контакту поживного розчину з коренями та мінімальні втрати рідини. Керування системою здійснюється контролером із таймером, який синхронізує роботу насоса з датчиками тиску, рівня, рН та ЕС. У разі падіння тиску або засмічення форсунок система може переходити в аварійний режим. Резервуар забезпечує стабільний запас поживного розчину з контрольованими фізико-хімічними параметрами, насос формує необхідний робочий тиск і витрату, трубопроводи передають розчин без значних гідравлічних втрат, а форсунки перетворюють потік рідини на дрібнодисперсний аерозоль з рівномірним розподілом у кореневій зоні. Система керування координує роботу всіх

вузлів у часі, регулюючи тривалість та частоту циклів розпилення, а також здійснює моніторинг тиску, рівня розчину та основних параметрів живлення.

2.2 Насосне обладнання та його характеристики:

Ефективність всієї системи в теплиці із аеропонною системою вирощування рослин залежить від багатьох факторів. Із них найважливішими є стала циклічність системи та якість зволоження. Насос забезпечує необхідний тиск і витрату розчину для створення аерозолю з оптимальним розміром крапель – від 10 до 90 мікрон. Такі краплі забезпечують надійний баланс між доступністю кисню, поживних речовин та вологою. Критичний діапазон: якщо краплі більші за 100 мікрон, коріння може почати тонутися у воді, якщо менші за 5-10 мікрон – можливе утворення небажаного «сухого туману», недостатнього для живлення. На відміну від традиційних гідропонічних систем, де насоси працюють при низькому тиску 5-20 PSI (0.2-1.5 бар) і просто переміщують розчин, аеропонні насоси повинні створювати та підтримувати високий тиск 70-120 PSI (5.1-8.3 бар). для забезпечення якісного розпилення. До основних характеристик для вибору насоса у системі належить:

1) Тиск (напір): Вимірюється в барах (Bar) або метрах водяного стовпа (м.в.ст.). Для стандартних аеропонних установок з форсунками типово необхідний тиск у діапазоні 2-10 бар (≈ 25 -100 м.в.ст.). Наприклад, для системи з 50 форсунками, що працюють за принципом "труба Вентурі", які мають вихідний отвір 0,4 мм, необхідний насос із мінімальним тиском у 6 бар для гарантованого створення дрібнодисперсного аерозолю кожною з них.

2) Продуктивність (витрата за цикл): Вимірюється в літрах на годину (л/год). Необхідна витрата розраховується, виходячи з кількості та типу форсунок. Більшість форсунок для аеропоніки можуть споживати від 10 до 50 л/год при робочому тиску. Таким чином, для тієї ж системи з 100 форсунок з середньою витратою 30л/год, мінімальна потрібна продуктивність насоса становитиме $100 \cdot 30 = 3000$ л/год.

3) Матеріали. Для насосів, що працюють з поживними розчинами (які часто мають високий вміст солей та мікроелементів), стійкість до корозії і механічного зношення елементів є надзвичайно важливим параметром. Нержавіюча сталь AISI 315, технічна кераміка та термопласти, наприклад PP-GF40 – це найпоширеніші матеріали для критичних компонентів: імпалер, вал, корпусу насоса. Це забезпечує довговічність при тривалій експлуатації в умовах аеропонної теплиці, а також зменшує витрати на обслуговування.

4) Режим роботи. Аеропонні системи працюють у цикли (наприклад, 15-40 секунд роботи / 3-7 хвилин паузи). Це означає, що цикл включення-виключення насоса за добу може відбуватися до кількох сотень разів. Тому ключовою характеристикою є стійкість до змінного режиму роботи та наявність захисту від перегріву. Для великих систем часто використовують насоси з частотним перетворювачем (ШІМ контролер), який дозволяє плавно регулювати параметри та економити електроенергію до 25-40%. Як приклад, для невеликої дослідницької установки з 20 форсунками може вистачити мембранного (діафрагмового) насоса на 4 бара та 800 л/год. Для промислової теплиці площею більше 400 м², де коріння розміщене в каналах загальною довжиною 2 км з тисячами форсунок, необхідний буде потужний багатоступінчастий гвинтовий (відцентровий) насос продуктивністю 15 000 – 20 000 л/год та тиском 10-12 бар, обладнаний системою резервування для безперебійної роботи.

Серед насосів, які використовуються в аеропонному вирощуванні рослин найчастіше використовують:

1) Діафрагмові насоси. Вони є найпопулярнішим вибором для середніх та великих аеропонних систем завдяки їх надійності та здатності створювати стабільний високий тиск. Принцип роботи базується на зворотно-поступальному русі гнучкої діафрагми (мембрани), яка створює циклічні зміни об'єму робочої камери.

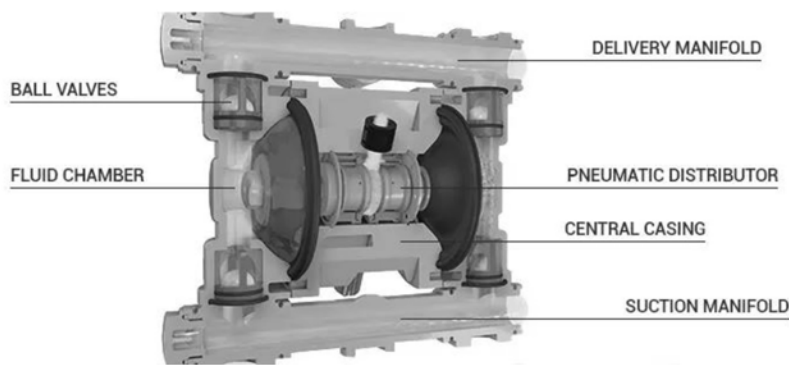


Рис. 2.1 Будова діафрагмового пневматичного насоса

До переваг діафрагмових насосів належить: здатність роботи до 2-3 метрів вертикального підйому, стійкість до абразивних частинок розміром до 0.5 мм, можливість перекачування розчинів з твердими включеннями, Порівняно невисока вартість: \$200-400 за базові моделі. До недоліків, можна віднести: значні пульсації тиску амплітудою 15-25 PSI, що вимагає встановлення проміжної ємності для розчину, періодична заміна діафрагм кожні 10-15 місяців при інтенсивній експлуатації, підвищений рівень шуму та нижча енергоефективність порівняно з плунжерними насосами.

2) Плунжерні або поршневі насоси. Вони найчастіше застосовуються у великих комерційних аеропонних системах. За принципом роботи – у цих насосах плунжер (циліндричний поршень) рухається у циліндрі, витісняючи рідину через клапани високого тиску.

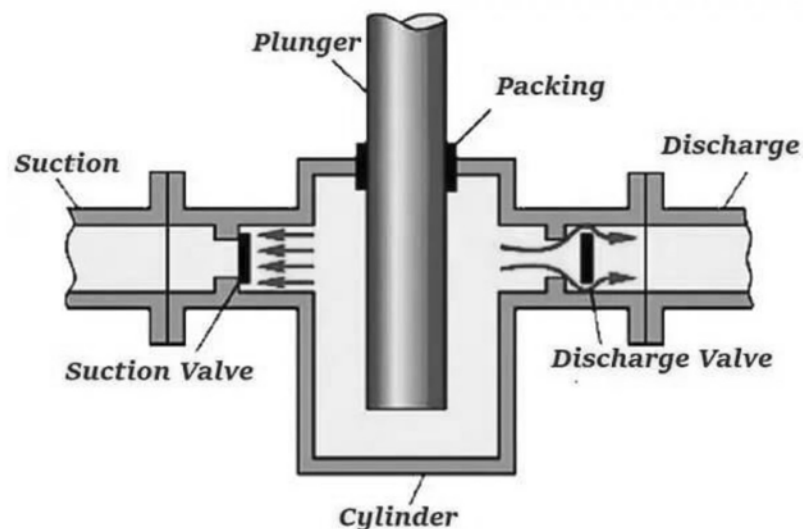


Рис. 2.2 Будова Плунжерного насоса

Серед переваг плунжерних насосів можна зазначити: високий тиск до 300 PSI для створення надтонкого туману; деякі тристоронні моделі забезпечують більш плавну подачу $\pm 5-8$ PSI; довговічність та великий ресурс роботи; висока енергоефективність: споживання 1.2-1.8 кВт при продуктивності 20 л/хв. Та точне регулювання постійного тиску. Недоліками є висока вартість: \$500-1,500 за промислові моделі, потреба в регулярному технічному обслуговуванні кожні 500-1,000 годин, неможливість працювати при сухому ході (у випадку аварійних ситуацій) та велика чутливість до якості води, адже насос не може працювати із розчином у якому є багато дрібнодисперсної фази твердих частинок чи кристалів солей.

3) Відцентрові насоси високого тиску. Найчастіше використовують у системах з поєднанням ультразвукового розпилення та негабаритних дослідних теплицях. До переваг належить подача живильного розчину без пульсацій (раптові зміни тиску у системі), низький рівень шуму та висока надійність. Серед недоліків є: недостатній тиск для НРА-систем (потрібно 60-100 PSI), чутливі до кавітації, вимагають постійної подачі рідини, що унеможливорює роботу при поломках у системі.

Взаємозв'язок між тиском та продуктивністю є однією із основних характеристик будь-якого насоса. Опис цієї характеристики зазвичай проводиться через криву продуктивності.

Таблиця 2.1 Типова крива продуктивності діафрагмового насоса.

0 PSI (вільний вихід)	15 л/хв	
40 PSI	12 л/хв	-20%
80 PSI	9 л/хв	-40%
100 PSI	6 л/хв	-50%
120 PSI	3 л/хв	-70%

Це означає, що при підвищенні робочого тиску продуктивність насоса значно падає. Тому насос завжди обирається з запасом по продуктивності 40-50%.

Як приклад, Для системи з 40 форсунками, кожна з яких споживає 2 л/год при 100 PSI: Загальна потреба становить $50 \cdot 2 = 100$ л/год = 1,66 л/хв. З

урахуванням постійного циклічного режиму роботи (30 сек робота / 5 хв):

миттєва потреба $\times 10 = 16,6$ л/хв. Якщо необхідний запас 30%, тоді $16,6 \cdot 1,4 = 21,58$ л/хв необхідної продуктивності при 100 PSI.

Також, якщо враховувати споживання енергії, що є критичним фактором у комерційних систем, енергоефективність насосів є одним із критичних факторів, адже насос працює протягом усього періоду росту рослини. Як приклад, плунжерні насоси можуть виправдовувати вищі

енергозатрати. завдяки стабільній високій якості розпилення, вищому тиску та меншим пульсаціям при розпиленні.

Таблиця 2.2 (порівняльна характеристика споживання електроенергії
діафрагмового та плунжерного насоса)

Діафрагмовий насос Shurflo 2088 (12 л/хв, 100 PSI):	Плунжерний насос CAT 310 (115 л/хв, 150 PSI):
Споживання: 90 Вт	Споживання: 1000 Вт
При циклі 30 сек / 5 хв (10% часу): 0,9 Вт середнього	При циклі 30 сек / 5 хв: 100 Вт середнього
Добове споживання: 0.2 кВт-год	Добове споживання: 2.64 кВт-год
Місячне споживання: 6.5 кВт-год	Місячне споживання: 79.2 кВт-год

2.3 Форсунки й системи розпилення.

Система розпилення є найважливішим елементом будь-якої аеропонної системи вирощування рослин, оскільки саме вона забезпечує перетворення поживного розчину у дрібнодисперсний туман, який контактує з кореневою системою рослин. Якість розпилення безпосередньо впливає на ефективність засвоєння води та поживних речовин, та повітря. Визначають швидкість росту рослин та загальну продуктивність системи. Розмір крапель, їх рівномірність розподілу та інші характеристики форсунок визначають стабільність параметрів розпилення та надійність роботи. Першим, і самим головним параметром у форсунках є здатність до формування розміру краплі. Оптимальний діапазон – від 20 до 80 мікрон. Це пов'язано із процесом формування рослини. А саме:

- Краплі >100 мікрон: Призводять до місцевого перезволоження, злипання коріння та дефіциту кисню.
- Краплі <10-15 мікрон: Створюють "сухий туман", який швидко вивітрюється, погано осідає і не забезпечує ефективного зволоження кореневої зони.
- Краплі 30-50 мкм: Ідеальний розмір. Забезпечує максимальну поверхню для поглинання поживних речовин та кисню, тримаючи коріння у оптимальному вологому середовищі.

Технічні характеристики форсунок формують всю систему розпилення:

- Гідравлічні (щілинні, конічні): прості, без рухомих частин. Створюють краплі 50-150 мкм. Вимагають високого тиску (3-8 бар) та чутливі до забруднень. Приклад: форсунка з вихідним отвором 0.3 мм при тиску 4 бар дає розпил конусом 80°.

- Пневматичні: використовують стиснене повітря для створення надтонкого аерозолю (зовнішнє підмішуванням повітря) (5-30 мкм). Вони є більш ефективні за гідравлічні, але вимагають окремого компресора. Ідеальні для лабораторних установок.

- Ультразвукові (діафрагмові): генерують найдрібніший туман (2-15 мкм) за рахунок вібрації мембрани. Мають низьку продуктивність і найчастіше використовуються в дослідних нішах (пророщування насіння, клонування, тощо).

- Взаємодія з агресивними поживними розчинами вимагає високої корозійної стійкості. Нержавіюча сталь (AISI 315), кераміка (Al_2O_3) та технічні полімери (PTFE, PEEK) – використовують найчастіше. Це сприяє довговічності та стабільності. Також важливим параметром є витрати поживного розчину, при розпилюванні. Стандартні форсунки мають витрату від 10 до 70 літрів на годину при робочому тиску 100 PSI. Так система з 100 форсунок, кожна з витратою 25 л/год, вимагатиме насоса продуктивністю мінімум 2500 л/год. Кут розпилення: впливає на зону покриття кореневої системи. Форсунки у яких кут розпилювання крапель відносно її центральної осі (каналу подачі розчину) 55-90° ефективно покривають кореневі масиви в каналах, тоді як 35-45° використовують для точного оброблення окремих коренів.

2.4 Аналіз технічних проблем при подачі аерозолю.

- Забруднення та кальцифікація форсунок. Поживні розчини містять солі (кальцій, залізо, фосфати), органічні речовини (залишки корневих виділень, біоплівка) та тверді частинки. Вони осідають на

критичних елементах: вихідних отворах (діаметр 0.1-0.5 мм) та внутрішніх каналах форсунок. Це призводить до зменшення вихідного отвору на 15-30% призводить до зростання робочого тиску в системі на 0.5-1 бар згідно закону Бернуллі, та збільшення навантаження на насос та зниження витрати на 15-25%. Також це впливає на зміну геометрії факелу на виході форсунки, тобто конус розпику деформується, з'являються "мертві зони". Рівномірність покриття кореневої маси падає на 30-60%, і сприяє збільшенню розміру крапель, так що забруднена форсунка генерує краплі понад 100-150 мкм замість оптимальних 30-50 мкм. Це призводить до локального перезволоження, недостатньої аерації та розвитку корневих гнилей.

- Нестабільність тиску в системі. Основними причинами є: зношування насоса і відповідно зниження продуктивності імелера; Негерметичність магістралей, що призводить до втрати тиску на стиках, тріщинах, неякісних фітингах; відсутність або несправність редукційного клапана та гідроаккумулятора. Як наслідок – це падіння тиску з 8 до 4 бар. І збільшення середнього розміру краплі майже вдвічі (напр., з 35 до 75 мкм); пульсації тиску (напр. ± 1 бар), викликає періодичне викидання великих крапель, що руйнує сталість середовища біля коренів; неоднаковий тиск у різних точках системи: Різниця в 2 бари між початком і кінцем розподільної колектора довжиною 20 метрів призводить до того, що частина рослин отримує аерозоль з краплями 35 мкм, а інша – 65 мкм.

- Конденсація аерозолі та утворення "мертвих зон". Дрібні краплі (15-30 мкм), рухаючись у повітрі камери з корінням, можуть об'єднуватися або осідати на стінках трубопроводів і поверхнях, що знаходяться далеко від коренів. Як наслідок до 15-20% обробленого розчину може безкорисно конденсуватися й капати на дно камери для вирощування, не потрапляючи на кореневу систему. Утворюються зони з підвищеною вологістю повітря, але з недостатнім покриттям самих коренів.

- Біологічне забруднення (біоплівка) в магістралях. Темпло (+20..+25°C) та наявність поживних речовин, кисню у повітрі всередині труб

призводять до того, що фрагменти біоплівки відриваються і повністю закупорюють тонкі отвори форсунок. Відбувається погіршення якості розчину (зниження рН, розмноження патогенів). А саме очищення від біоплівки значно складніше, ніж від мінеральних відкладень.

2.5 Рішення для оптимізації роботи системи живлення.

- Профілактика забруднення. До найпопулярніших рішень можна віднести: фільтрацію поживного розчину. Тобто обов'язкове встановлення дискового або сітчастого фільтра тонкої очистки (15-25 мкм) на всмоктувальній лінії насоса, а також регулярне промивання за допомогою автоматичної системи промивки чистою водою з добавками для очищення (напр., лимонною кислотою для розчинення кальцію) Із інтервалом 36-48 год. тривалістю 5-10 хвилин. Використання стійких до осадження матеріалів: труб та фітингів з гладкою внутрішньою поверхнею (наприклад, PTFE, PP).

- Стабілізація тиску. Для цього використовують Гідроакумулятор. Елемент системи що є проміжним між насосом і системою зрошування. Використання навіть із ємністю 2-5 літрів для середньої системи дозволяє компенсувати пульсації та забезпечити стабільну роботу форсунок при запуску системи. Застосування редукційних клапанів та манометрів встановлених на кожній критичній лінії для моніторингу та корекції, призводить до точного контролю і регулюванню якості зрошення. Точний розрахунок діаметру магістральної труби із, застосуванням змінного січення сприяє стабільній швидкості потоку, що не є більшою за 1.5 м/с (для труби діаметром 25 мм продуктивність не повинна перевищувати ~1300 л/год).

- Правильний підбір та обслуговування обладнання. Якщо проводити розрахунок "запасом" при проектуванні теплиці, можна запобігти багатьом непередбачуваним наслідками. Так насос повинен забезпечувати 125-135% від розрахункової потреби по витраті та тиску. Модульність та доступність конструкції системи повинна дати можливість забезпечувати швидкий демонтаж при заміні чи обслуговуванні елементів. Контроль середовища в кореневій зоні. Підтримка температури на

рівні +18...+21°C для мінімізації конденсації та забезпечення вентиляції в камері з корінням для видалення надлишкової вологості повітря та запобігання утворенню надто густих туманів.

2.6 Висновки до розділу 2.

Аналіз технічних проблем при подачі аерозолю в аеропоніці демонструє, що висока ефективність цієї технології у практичній площині суттєво залежить від інженерної надійності та глибини розуміння технологічних процесів. Подача аерозолю – це динамічна, чутлива система, де хімія поживного розчину, гідродинаміка, матеріалознавство та біологія рослини перетинаються. Аеропоніка, як технологія виходить за рамки просто агрономії. Вона вимагає від оператора знань інженера-гідравліка, хіміка-технолога та системного адміністратора. Успіх залежить від переходу від вчасного усунення проблем до ефективного управління ризиками на основі постійного моніторингу даних (тиск, витрата, електропровідність, температура в кореневій зоні). Технологічна зрілість аеропонної установки тим, наскільки швидко, системно та з мінімальними втратами усі технологічні завдання і проблеми виявляються та усуваються. Таким чином, розвиток аеропоніки передбачає точної інженерної дисципліни, де кожна технічна деталь прямо впливає на розвиток та фізіологію рослини. До основних рішень можна віднести:

- Розуміння, що проблеми мають системний та кумулятивний характер. Забруднення форсунок, коливання тиску, біоплівка в магістралях є частинами однієї причинно-наслідкової системи. Наприклад, осадження карбонату кальцію на 20% звужує вихідний отвір форсунки, що призводить до зростання тиску в системі на 0.7 бар, що, у свою чергу, змушує насос працювати в режимі перевантаження, прискорюючи його знос. Це, врешті-решт, викликає падіння загального тиску та збільшення розміру крапель до 100-120 мкм, що запускає біологічну проблему – розвиток корневих гнилей. Таким чином, технічна несправність неминуче трансформується у біологічний стрес і економічні збитки.

- Критичність профілактики на порядок вища, ніж ремонту. Вартість втраченого врожаю через зупинку системи протягом двох днів при аварійному ремонті значно перевищує вартість річного комплексу профілактичних заходів. Регулярне (щоденне або щотижнєве) автоматичне промивання системи розчином підкисленої води, наявність фільтрів тонкої очистки (15-25 мкм), є не витратами, а стратегічними інвестиціями в стабільність.

- Ефективність визначається найслабшою ланкою. Навіть точно розрахований насос і найдорожчі форсунки будуть не рентабельні, якщо один дешевий пластиковий фітинг протікає. Тому підхід до системи повинен бути комплексним: від якості вихідної води та розчинених добрив до матеріалів усіх контактних поверхонь (нержавіюча сталь AISI 312, PTFE, PP) і точності виконання монтажних робіт.

3. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Для визначення впливу основних чинників на ефективність очищення форсунок аеропонної системи від забруднень, що утворюються в процесі експлуатації, було проведено серію факторних експериментів із використанням ультразвукової ванни. Дослідження спрямоване на оцінку впливу режимів миття та складу мийного середовища на якість очищення елементів системи розпилення поживного розчину. У ході дослідження було реалізовано три повних факторних експерименти, кожен з яких складався з чотирьох серій дослідів із варіюванням умов. У першому експерименті очищення форсунок здійснювалось у дистильованій воді, у другому — у водному розчині лимонної кислоти, у третьому — у водному розчині кальцинованої соди. Склад і концентрація мийних розчинів у межах кожного експерименту залишались сталими. Як фактори впливу було обрано температуру мийного розчину та тривалість ультразвукової обробки. Температура розчину змінювалась у межах 20, 40 та 60 °С, а час процедури миття становив 10, 15 та 20 хвилин відповідно. Таке поєднання факторів дозволило оцінити як окремий, так і сумісний вплив температури та тривалості обробки на процес очищення. У ролі об'єктів дослідження використовувались стандартні форсунки аеропонної системи, попередньо одитнаково забруднені експлуатаційними відкладеннями, характерними для роботи з поживними розчинами. Очищення проводилось в ультразвуковій ванні, що забезпечувала стабільні умови нагріву та ультразвукової дії протягом усього експерименту. Критерієм оптимізації обрано ступінь очищення форсунок, що визначався за допомогою вимірювання кількості води, що проходила крізь форсунку за сталого тиску. Це найважливіша експлуатаційна ознака відновлення прохідності розпилювальних каналів після завершення процедури миття. Отримані результати дозволили оцінити ефективність різних мийних середовищ та режимів ультразвукової обробки і визначити найбільш раціональні параметри очищення форсунок аеропонних установок.



Рис. 3.1. – Ультразвукова ванна моделі Ultrasonic Cleaner JP-031S.



Рисунок 3.2. – приклад зважування на електронних вагах моделі PS 510.

R1

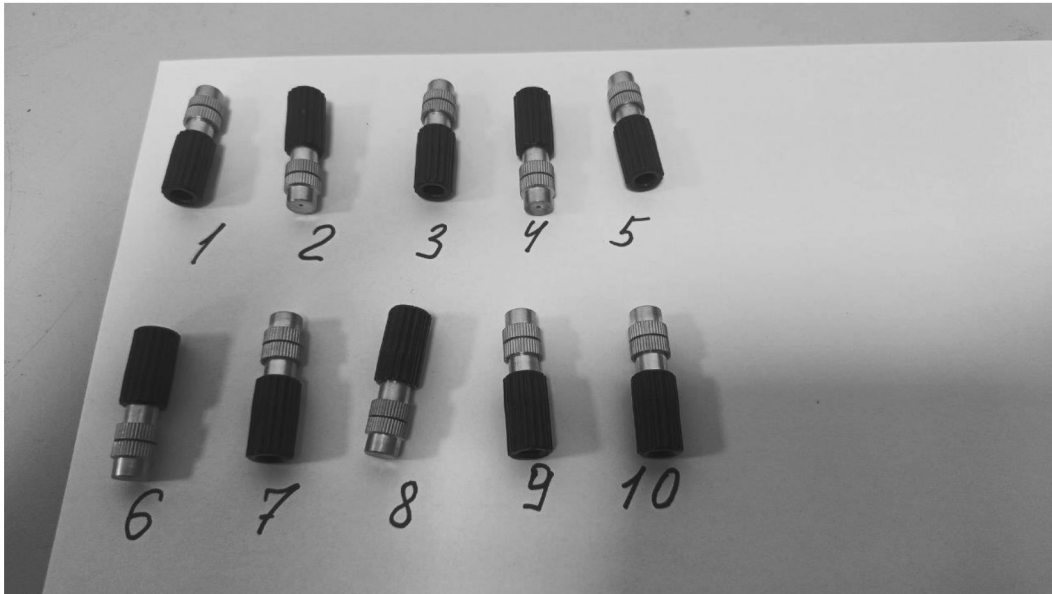


Рисунок 3.3. – Штучно забруднені Форсунки.



Рисунок 3.4. – Налаштування ультразвукової ванни.



a)



б)

Рисунок 3.5. (а, б) – Процес миття форсунок.



Рисунок 3.6 – Проведення дослідів із пропусканням дистильованої води через очищену форсунку за сталого тиску в системі.



а)



б)

Рисунок 3.7 (а, б) – Зважування зібраної дистильованої води.



а)



б)

Рисунок 3.8 – (а, б,) приклад розпилювання води через засмічену форсунку.

4. ОПРАЦЮВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ.

Під час дослідження процесу очищення форсунок в ультразвуковій ванні було враховано, що поєднання в одному експерименті якісних і кількісних факторів унеможливорює побудову точної математичної моделі процесу. Це пояснюється тим, що якісні фактори мають дискретний характер і визначають природу впливу середовища, тоді як кількісні — описують його інтенсивність або тривалість. У нашому випадку до якісних факторів належить тип розчину для миття (дистильована вода, розчин лимонної кислоти, розчин лугу), а до кількісних — температура розчину та тривалість ультразвукової обробки.

З метою забезпечення репрезентативності результатів і підвищення точності оцінки впливу окремих факторів на ефективність очищення було прийнято рішення провести три повні факторні експерименти (ПФЕ), кожен із яких відповідав окремому типу розчину для очищення. Такий підхід дозволив розділити вплив якісного фактора (типу розчину) та кількісних змінних, що надалі дало можливість побудувати незалежні моделі для кожного середовища очищення.

Було проведено три серії дослідів для кожного із факторних експериментів. У кожному ПФЕ досліджено два кількісних фактори. А саме: зміна температури розчину в ультразвуковій ванні та час експозиції форсунок у розчині. Для кожного поєднання факторних рівнів проводили окремі досліди, у ході яких оцінювали інтенсивність проходження дистильованої води крізь форсунки після очищення. Для усунення впливу зовнішніх умов (зміна температури приміщення, механічні вібрації або зміщення положення форсунок, випаровування розчину, тощо) порядок виконання дослідів у межах кожного експерименту було рандомізовано.

Завдяки такій організації дослідження вдалося зменшити вплив систематичних похибок, отримати статистично обґрунтовані результати та створити передумови для подальшої побудови рівнянь регресії, які описують

взаємозв'язок між температурою, тривалістю очищення та ефективністю відновлення пропускної здатності форсунок.

ПФЕ №1 (Дистильована вода).

Серія 1.1 – 1, 4, 3, 2.

Серія 1.2 – 1, 4, 2, 3.

Серія 1.3 – 2, 3, 4, 1.

Для ПФЕ №2. (Розчин 5% лимонної кислоти $C_6H_8O_7$).

Серія 2.1 – 1, 3, 1, 4.

Серія 2.2 – 2, 4, 3, 1.

Серія 2.3 – 4, 2, 3, 1.

Для ПФЕ №3 (Розчин 5% кальцинованої соди Na_2CO_3).

Серія 3.1 – 1, 2, 3, 4.

Серія 3.2 – 4, 3, 2, 1.

Серія 1.2 – 4, 1, 2, 3.

При побудові математичних моделей для кожного з проведених повних факторних експериментів (ПФЕ) та подальшому опрацюванні отриманих результатів були розроблені відповідні математичні плани експерименту, у яких було визначено послідовність і комбінацію рівнів факторів. Для кожної серії дослідів, відповідної певному типу розчину миття, було сформовано власну матрицю плану, яка містила кодування кількісних факторів — температури та тривалості очищення — у вигляді нормованих рівнів (–1, 0, +1). Це дозволило провести повний цикл експериментів у строго визначених комбінаціях параметрів, забезпечити можливість порівняння результатів між серіями та створити умови для побудови регресійних рівнянь, що описують залежність ефективності очищення форсунок від основних технологічних

параметрів процесу. Для оптимізації t (20– 60 °C) та T (10 – 30 хв) використано двохфакторний план Бокса-Бенкена (BBD), який забезпечує побудову рівнянь регресії другого порядку та аналіз взаємодії факторів. Такий підхід відповідає сучасним методикам побудови математичних моделей і дозволяє отримати репрезентативну модель коли робота з крайніми параметрами (висока температура, сильний луг, тощо) небезпечна для зразків чи обладнання.

Таблиця 4.1

План дослідів для ПФЕ №1.

№ Досліду	Факторна змінна *	t , год	T , °C
	x_0	x_1	x_2
1	+	+	+
2	+	-	-
3	+	-	+
4	+	+	-

Таблиця 4.2

План дослідів для ПФЕ №2.

№ Досліду	Факторна змінна *	t , хв	T , °C
	x_0	x_1	x_2
1	+	-	-
2	+	+	+
3	+	-	+
4	+	+	-

Таблиця 4.3

План дослідів для ПФЕ №3.

№ Дослід	Факторна змінна *	t, хв	T, °C
	x_0	x_1	x_2
1	+	+	+
2	+	-	-
3	+	+	-
4	+	-	+

* Факторна змінна x_0 необхідна для можливості побудови математичних моделей і проведенню розрахунків.

Для кожного проведеного дослідів була порахована ефективність очищення форсунки за формулою:

$$E_i = \frac{V_c - V_d}{V_0 - V_d} \times 100\%$$

E_i – Ефективність очищення форсунки.

V_0 – Об'єм рідини, що протікає через нову форсунку за 5 хв.

V_c – Об'єм рідини, що протікає через очищену форсунку за 5 хв.

V_d – Об'єм рідини, що протікає через забруднену форсунку за 5 хв.

Значення змінних параметрів для кожного із трьох експериментів (t – тривалість миття в ультразвуковій ванні, T – температура розчину)

Таблиця 4.4

Рівень факторів	t, хв	T, °C
-	10	20
0	15	40
+	20	60

У проведених дослідів діапазон змінних був визначений у зазначених межах через властивості матеріалів форсунок та особливості процесу ультразвукового очищення. А градація факторів була визначена наступною,

для можливості побудови фізико-математичних моделей процесу миття. Максимальне значення температури розчину було обмежене 60 °С, щоб уникнути можливого пошкодження поверхневого шару мідних і латунних форсунок, а також надмірного утворення оксидного нальоту. Час обробки не перевищував 20 хв, оскільки подальше його збільшення після досягнення ефекту очищення не давало суттєвого приросту ефективності (більше ніж 5–7 %), але значно підвищувало витрати енергії та ризик механічної деградації ультразвукових елементів і поверхні форсунок.

Реалізація плану ПФЕ №1

Таблиця п

№ Досліду	Матриця дослідів 2^2			% ефективність очищення форсунки			Сер. знач.
п	x_0	x_1	x_2	E_i	E_i	E_i	E_y
1	+	+	+	94,41	93,98	94,04	94,14
2	+	-	-	88,43	87,93	88,12	88,16
3	+	-	+	91,23	92,01	91,52	91,58
4	+	+	-	89,62	90,17	89,24	89,67

Реалізація плану ПФЕ №2

Таблиця п

№ Досліду	Матриця дослідів 2^2			% ефективність очищення форсунки			Сер. знач.
п	x_0	x_1	x_2	E_i	E_i	E_i	E_y
1	+	-	-	95,37	95,24	95,05	95,22
2	+	+	+	98,52	97,84	98,54	98,29
3	+	-	+	97,66	96,89	97,37	97,31
4	+	+	-	96,36	95,87	96,41	96,21

Реалізація плану ПФЕ №3

Таблиця п

№ Досліду	Матриця дослідів 2^2			% ефективність очищення форсунки			Сер. знач.
п	x_0	x_1	x_2	E_i	E_i	E_i	E_y
1	+	+	+	97,29	96,75	97,05	97,03
2	+	-	-	94,35	94,67	95,02	94,68
3	+	+	-	91,28	92,01	91,52	91,6
4	+	-	+	96,40	95,69	95,73	95,94

Враховуючи, що для критерію Кохрена при заданих умовах експерименту — коли кількість паралельних дослідів для кожної із серій становить $n = 4$, а число ступенів свободи для кожної оцінки дисперсії $G_n = 2$, табличне значення критерію визначається як $G_t = 0.77$, було виконано перевірку однорідності дисперсій для кожного з проведених факторних експериментів.

$$Gp = \frac{S_{uMax}^2}{\sum_{u=1}^n S_u^2} \leq Gm(0,05; n; f_u).$$

Розрахункове значення для ПФЕ №1 буде:

$$Gp = \frac{0,219}{0,635} = 0,344 \leq Gm(0,05; n = 4; f = 2_u).$$

Враховуючи дисперсію відтворюваності 0,159.

Розрахункове значення для ПФЕ №2 буде:

$$Gp = \frac{0,115}{0,393} = 0,292 \leq Gm(0,05; n = 4; f = 2_u).$$

Враховуючи дисперсію відтворюваності 0,04.

Розрахункове значення для ПФЕ №3 буде:

$$Gp = \frac{0,127}{0,312} = 0,407 \leq Gm(0,05; n = 4; f = 2_u).$$

Враховуючи дисперсію відтворюваності 0,19.

Перевірка за критерієм Кохрена дозволяє встановити, чи можна вважати результати дослідів відтворюваними, тобто чи є розкид експериментальних даних у межах статистично допустимих значень. Якщо розрахункове значення критерію G_p не перевищує табличне, дисперсії вважаються однорідними, а результати дослідів — статистично достовірними та узгодженими між собою. Це підтверджує надійність експериментальних вимірювань і правильність вибору умов для подальшої побудови математичних моделей. У нашому випадку розрахункові значення для кожної серії дослідів є менші від табличного. Отже можна стверджувати про відтворюваність процесів. На основі цього ми будемо відповідні математичні моделі за кожним із факторних експериментів. Як правило, математичну модель, отриману на основі плану другого порядку, подають у вигляді рівняння регресії, яке описує залежність вихідного параметра від досліджуваних факторів. Така модель зазвичай має форму полінома другого ступеня або так званого неповного квадратного рівняння, що дозволяє врахувати не лише основні (лінійні) впливи факторів, але й ефекти їх взаємодії та квадратичні залежності. Це забезпечує більш точне відображення реальних процесів, зокрема впливу температури та часу обробки на ефективність очищення форсунок.

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3$$

Тут b_1, b_2, b_3 — коефіцієнти при кожному зі значень наших змінних, які можна обчислити за наступними формулами:

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{p=1}^N x_{0j} y_j = \frac{1}{N} \sum_{p=1}^N y_j; \quad b_{ik} = \frac{1}{N} \sum_{p=1}^N x_{ij} x_{kj} y_j;$$

$$b_i = \frac{1}{N} \sum_{p=1}^N x_{ij} y_j; \quad b_{isk} = \frac{1}{N} \sum_{p=1}^N x_{ij} x_{sj} x_{kj} y_j;$$

На основі отриманих формул для розрахунку коефіцієнтів рівняння регресії побудовано розширені матриці планів для кожної із серій експериментів. У цих матрицях враховано не лише основні фактори, але й

їхні можливі взаємодії. Тобто комбінований вплив кількісних факторів, що дозволяє більш точно описати їх індивідуальний вплив на досліджуваний процес, а також, зрозуміти тенденцію змін результуючих значень. Такий підхід забезпечує вищу достовірність результатів, і сприяє можливості створення адекватної математичної моделі впливу різних засобів очищення для кожної системи із градацією вказаних факторів при проведенні процесу миття форсунок в ультразвуковій ванні.

Розширена матриця для ПФЕ №1

№ Досліду	Матриця ПФЕ 2 ²				Сер. знач.
n	x ₀	x ₁	x ₂	x ₁ x ₂	d _y
1	+	+	+	+	94,14
2	+	-	-	+	88,16
3	+	-	+	-	91,58
4	+	+	-	-	89,67

Розширена матриця для ПФЕ №2

№ Досліду	Матриця ПФЕ 2 ²				Сер. знач.
n	x ₀	x ₁	x ₂	x ₁ x ₂	d _y
1	+	-	-	+	95,22
2	+	+	+	+	98,29
3	+	-	+	-	97,31
4	+	+	-	-	96,21

Розширена матриця плану ПФЕ №3

№ Досліду	Матриця ПФЕ 2 ²				Сер. знач.
n	x ₀	x ₁	x ₂	x ₁ x ₂	d _y

1	+	+	+	+	97,03
2	+	-	-	+	94,68
3	+	+	-	-	91,6
4	+	-	+	-	95,94

Після опрацювання результатів експериментів (на основі розширених матриці плану ПФЕ 2²) були складені наступні рівняння регресії, які подано у загальній формі:

$$y_1 = 90,89 + 1,02x_1 + 1,97x_2 + 0,26x_1x_2.$$

$$y_2 = 96,75 - 0,51x_1 + 1,04x_2 - 0,025x_1x_2.$$

$$y_3 = 94,81 - 0,53x_1 + 1,67x_2 + 1,04x_1x_2.$$

Серед різних методів оцінки достовірності отриманих рівнянь регресії, таких як перевірка відтворюваності результатів за критерієм Кохрена чи визначення значущості окремих коефіцієнтів за критерієм Коефіцієнт детермінації R^2 та скоригований R^2 додатково використовують критерій Фішера. Цей критерій дозволяє оцінити, наскільки побудоване рівняння регресії адекватно описує експериментальний процес, тобто чи відрізняються розрахункові значення від експериментальних у межах випадкових похибок. Тому, кожна з побудованих математичних моделей була перевірена на адекватність шляхом аналізу дисперсії за критерієм Фішера (F-критерієм). Суть перевірки полягає в тому, щоб оцінити, наскільки отримане рівняння регресії достовірно описує експериментальні дані. Якщо розрахункове значення критерію F_p не перевищує табличного F_t при заданому рівні значущості, то модель вважається адекватною, тобто придатною для подальшого аналізу і прогнозування.

У даній роботі перевірку проводили для рівня значущості $\alpha = 0.05$ (5 %), що відповідає 95 % імовірності у довірчому інтервалі. Для кількості ступенів вільності, прийнятої в кожному з експериментів, табличне значення критерію Фішера становило $F_t = 5.318$. Таким чином, якщо

$$F_p \leq 5.318$$

то відхилення між експериментальними та розрахунковими даними не є статистично значущими, і модель можна вважати адекватною до результатів експерименту. F_p обчислюється за формулою:

$$F_p = \frac{S_{ad}^2}{S_y^2} \leq F_T(0,05; f_{ad}; f_u).$$

S_{ad}^2 – дисперсія адекватності для цієї моделі.

S_{ad}^2 – дисперсія відтворюваності для цієї моделі.

Розраховані значення критерію F_p для кожної вибраної моделі:

$$F_{1p} = \frac{S_{ad}^2}{S_y^2} = \frac{0,279}{0,159} = 1,76 \leq F_T(0,05; f_{ad}; f_u).$$

$$F_{2p} = \frac{S_{ad}^2}{S_y^2} = \frac{0,171}{0,04} = 4,27 \leq F_T(0,05; f_{ad}; f_u).$$

$$F_{3p} = \frac{S_{ad}^2}{S_y^2} = \frac{0,49}{0,19} = 2,58 \leq F_T(0,05; f_{ad}; f_u).$$

Враховуючи, що розрахункові значення F-критерію F_p виявилися меншими у кожному із експериментів за табличне $F_T = 5,318$ - це свідчить про відсутність суттєвих відхилень між експериментальними та теоретичними даними. Отже, побудовані моделі адекватно описують результати досліджень.

Щоб визначити значущість кожного коефіцієнта регресії ми використовуємо критерій Стюдента.

$$|b_a| \geq \Delta b_a = t(0,05; f_i) \frac{S_y}{\sqrt{n}}$$

Відповідно до критерію Стюдента, якщо виконується наведена вище умова, це означає, що відповідні коефіцієнти регресії є статистично значущими і роблять вагомий внесок у формування моделі. У проведених дослідях рівень значущості прийнято $\alpha = 0.05$ (довірча ймовірність 0.95). При кількості ступенів свободи для дисперсії відтворюваності що дорівнює 8,

табличне значення критерію Стюдента становить 2,31. Це дає змогу виконати перевірку значущості кожного коефіцієнта рівняння регресії та визначити, які фактори мають істотний вплив на ефективність процесу очищення.

Для реалізації плану ПФЕ №1

$$\Delta b_a = 2,3 \frac{\sqrt{0,159}}{\sqrt{4}} = 0,45.$$

У рівнянні регресії значущим є перші три коефіцієнти. Третій коефіцієнт є меншим від розрахункового критерію. Тоді рівняння набуде вигляду:

$$y_1 = 90,89 + 1,02x_1 + 1,97x_2.$$

Для плану ПФЕ №2

$$\Delta b_a = 2,3 \frac{\sqrt{0,04}}{\sqrt{4}} = 0,23.$$

У рівнянні регресії значущим є всі коефіцієнти. Тоді рівняння залишиться без змін:

$$y_2 = 96,75 - 0,51x_1 + 1,04x_2 - 0,025x_1x_2.$$

Для плану ПФЕ №3

$$\Delta b_a = 2,3 \frac{\sqrt{0,19}}{\sqrt{4}} = 0,5.$$

У рівнянні регресії значущим є всі коефіцієнти. Тоді рівняння залишиться без змін:

$$y_3 = 94,81 - 0,53x_1 + 1,67x_2 + 1,04x_1x_2.$$

Був здійснений перехід від кодованих значень до дійсних, коли можна підставляти натуральні значення у відповідних розмірних одиницях. Так були отримані наступні рівняння регресії:

Для плану ПФЕ №1

$$Y_1 = 55,45 + 0,7x_1 + 0,5x_2.$$

Для плану ПФЕ №2

$$Y_2 = 62,8 - 0,6X_1 + 0,32X_2 - 0,029X_1X_2.$$

Для плану ПФЕ №3

$$Y_3 = 60,19 + 0,7X_1 - 0,28X_2 + 0,011X_1X_2.$$

На основі отриманих рівнянь були побудовані поверхні відгуку.

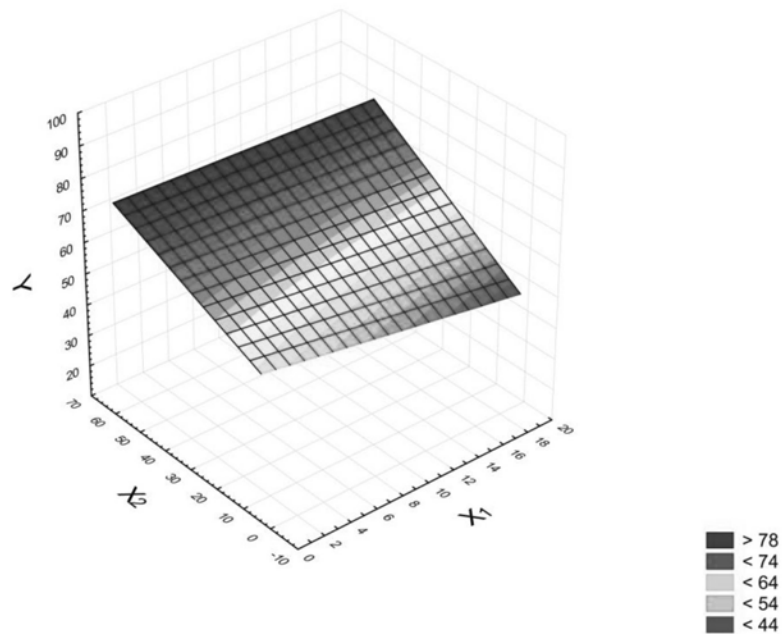


Рис.4.1 Поверхні відгуку $C = f(t, T)$

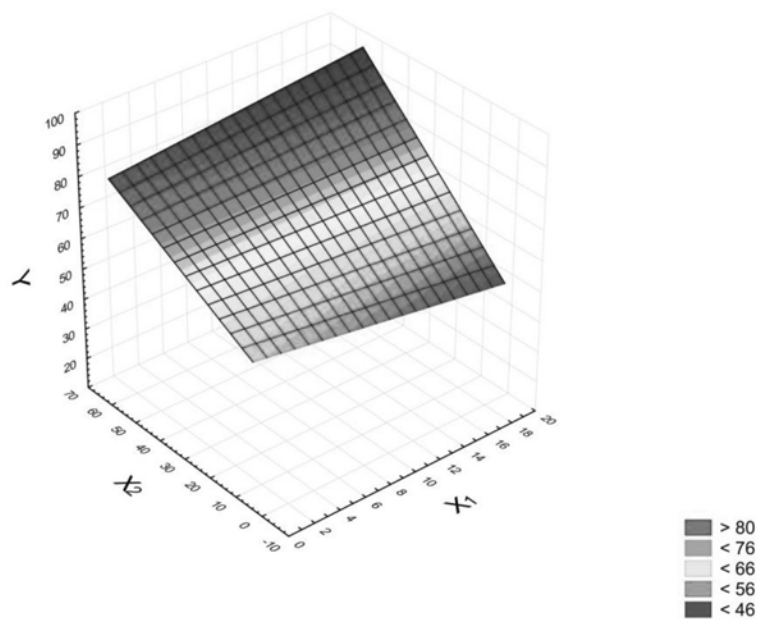


Рис.4.2 Поверхні відгуку $C = f(t, T)$

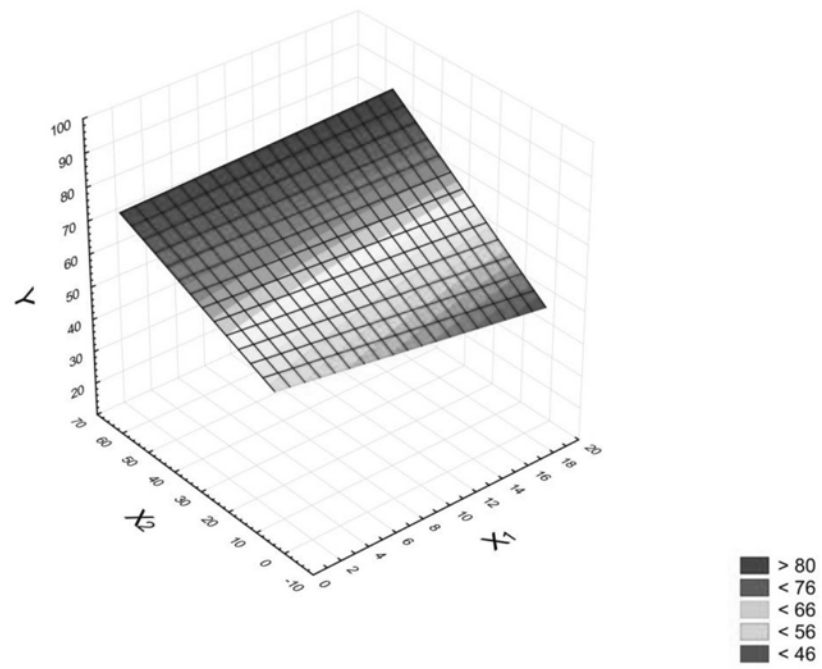


Рис.4.3 Поверхні відгуку $C = f(t, T)$

5. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

5.1. СТРУКТУРНО-ФУНКЦІОНАЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТРАВМОНЕБЕЗПЕЧНИХ СИТУАЦІЙ ВПРОДОВЖ ВИКОНАННЯ РОБІТ

Найбільш характерними причинами виникнення нещасних випадків є: відсутність або недостатній інструктаж персоналу про правила безпеки, порушення технологічного процесу, несправність устаткування, пристосування та інструмент або його невідповідність умовам виконуваних робіт, відсутність огорож, написів, невідповідна спецодяг, недостатнє освітлення, низький рівень технічної культури виробництва. Усунення зазначених недоліків сприяє різкому поліпшенню умов праці і, отже, зниженню травматизму.

Під час робіт з тепличним обладнанням можливі такі небезпечні чинники:

- ураження електричним струмом при дотику до струмоведучих частин електричних машин;
- хімічні опіки від дії компонентів підживлювальних розчинів;
- термічні опіки при приготуванні розчинів;
- отруєння шкідливими випарами;
- травми різного роду механічного характеру.

Будь-який небезпечний виробничий чинник незалежно від його виду, рівня та інших властивостей має певну зону дії. Якщо розміри цієї зони мають чітко фіксовані значення, то її можна вважати постійною. Якщо у процесі роботи така зона може змінюватися внаслідок зміни рівня небезпечного чинника, його переміщень у просторі, то вона буде змінною. У деяких випадках (аварійна ситуація) небезпечний виробничий чинник може значно виходити за межі визначено (фіксованої) зони. При цьому небезпека

травмування працюючого виникає уже за межами небезпечної зони. Тому кожен працівник на конкретній машині чи певному робочому місці завжди повинен знати про таку небезпеку. Постійні небезпечні зони існують або виникають у передачах, при обробці деталей на токарних, свердлильних, заточувальних верстатах, біля різальних інструментів, у пресах, пневматичних та гідравлічних молотах, штампувальних верстатах, під машинами та платформами, піднятими за допомогою гідравлічної чи іншої системи [29].

Небезпечні умови можуть визначатися недоліками конструкцій машин, технологічного обладнання і процесів, низьким рівнем організації виробництва (неефективність або відсутність необхідного контролю, низькі професійний рівень працюючих, підготовка їх з охорони праці), недостатньою надійністю виробничого обладнання тощо. Вони відіграють пріоритетну роль у формуванні й виникненні виробничих небезпек – певного стану, за якого виникає реальна загроза аварії або травми. Це пояснюється тим, що навіть при наявності кількох небезпечних виробничих факторів на певному робочому місці, але якщо жоден з них не має умов, за яких він міг би діяти на людину, то на цьому робочому місці відсутня реальна небезпека травмування. Інша справа, коли такі умови є, але про них працюючий не знає. Процес виявлення небезпечних умов у деяких випадках може бути досить складним, тому необхідно проводити спеціальні дослідження. Аналіз небезпечних умов, які існують чи виникають безпосередньо на виробництві показав, що за характером дії їх можна поділити на групи, які [29]:

- характеризують стан або рівень безпеки виробничого обладнання або певного робочого місця (відсутність огороження рухомих деталей або робочих органів, відсутність або недосконалість спеціальних технічних засобів безпеки: блокувальних пристроїв, засобів сигналізації тощо), конструктивні недоліки окремого вузла чи машини та інші;

- спонукають працюючого допускати помилки у процесі праці (конструктивна недосконалість технологічного процесу роботи машин або самої машини чи певного обладнання), низька кваліфікація працюючого та рівень знань з охорони праці, відсутність відповідного контролю за дотриманням правил з охорони праці;

- створюють можливість проникнення працюючого у небезпечну зону (відсутність огорожень небезпечної зони і сигналізації про наближення до небезпечної зони, неправильна організація робочого місця та інші);

- призводять до виникнення інших небезпечних умов (помилки у монтажі роторів, що обертаються, деякі конструктивні недоліки);

- безпосередньо призводять до травмонебезпечної ситуації (наявність плям масла на підлозі, неправильно організоване робоче місце, не обґрунтовані режими роботи обладнання та інші);

- призводять до виникнення небезпечних дій (низький рівень професійної підготовки й організації навчання з охорони праці, відсутність або неефективність контролю з охорони праці та інші). Небезпечні обставини розпізнаються аналогічно звичайним обставинам, на що вказує та чи інша обставина. Небезпечні обставини розкривають дії, стан чи ознаки небезпечного фактора і обстановку, при якій він діяв на людину. Якщо внаслідок аварії технічної системи виникли травми у людей, то сам випадок травми необхідно розглядати як подію, що є наслідком аварії. Це стосується тих систем, у яких підсистемами одночасно є машина (технічний засіб) і людина [29].

5.2. МОДЕЛЮВАННЯ ВИНИКНЕННЯ ТРАВМ ТА АВАРІЙ

На даний час методикою оцінки рівня небезпеки робочих місць, машин, виробничих процесів та окремих виробництв передбачено пошук об'єктивного критерію (показника) рівня небезпеки для конкретного об'єкта. Таким показником вибрана ймовірність виникнення аварії, травми або катастрофи залежно від досліджуваного явища.

З метою запровадження оцінки рівня небезпеки певного об'єкта чи явища на виробництві, необхідно застосувати простий і доступний метод обчислення значень ймовірності будь-якого випадкового явища. Основні принципи цього методу полягають у тому, що на основі обстеження робочого місця чи окремої машини (об'єкта) виявляють виробничі небезпеки, можливі аварійні або травмонезбезпечні ситуації. Для оцінки ситуацій визначають події, які можуть стати головною подією при побудові логіко-імітаційної моделі аварії або травми (чи катастрофи). Після цього будують модель («дерево відказів і помилок оператора»). При цьому важливе значення має правильний вибір головної випадкової події.

Після вибору головної випадкової події (події) розпочинають побудову моделі («дерева») [29]. Використовуючи оператори «І» та «АБО», виконують набір ситуацій (відомих до цього), які можуть призвести до тієї події, яка вибрана як головна. Наприклад, під час розточування гільз в блоці циліндрів двигуна, небезпечним явищем цього буде травмування робітника різцем або намотування на обертові частини верстата частини одягу. Отже, приймаємо подію «травма» її як головну зв'язують з наступною подією шляхом логічного аналізу. Після визначення відповідних аварійних, травмонезбезпечних або катастрофічних ситуацій та їх кількості, визначаємо інші події, що входять до кожної такої ситуації, логічним аналізом із застосуванням операторів «І», «АБО» та інших. Процес побудови моделі триває поки не будуть знайдені усі базові події, що визначають межу моделі.

Будь-яка логіко-імітаційна модель як правило характеризується із застосуванням різних символів тієї чи іншої події, яка першою чергою бере

свій початок з головної події, а наступні розміщуються після неї зверху вниз, аж до базових подій.

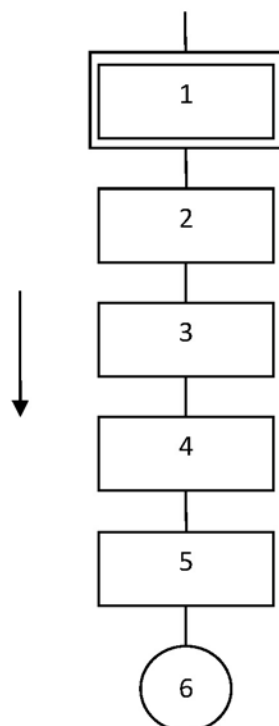
Основні принципи побудови моделі такі: вивчається виробництво, на якому мали місце раніше або можуть мати місце аварії та виробничі травми.

5.3. РОЗРОБКА ЛОГІЧНО-ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ ТРАВМ НА ВИРОБНИЦТВІ

В процесі створення логіко-імітаційних моделей застосовують різні символи, які характеризують ті чи інші події. За звичай, побудова моделі розпочинається з головної події, а наступні розміщують зверху вниз, аж до базових подій (рис. 5.1) [29].

На схемі кожен блок, позначений відповідним номером, та означає подію (у загальному вигляді) або окремий етап побудови моделі:

- 1 – відмова (аварія, травма) системи – головна подія;
- 2 – послідовність подій, що призводять до відмови системи;
- 3 – послідовність подій зображується за допомогою логічних операторів “І”, “АБО” та інших;



- 4 – усі входні і вихідні події, що входять до моделі, зображуються у вигляді прямокутників з відповідними написами всередині;

- 5 – послідовний підхід до базових подій, частоти виникнення яких відомі;

- 6 – базові події зображують у вигляді у вигляді кружечків із написами всередині, вони є межею аналізу побудованої моделі (“дерева помилок”).

Рисунок 5.1 – Схема основних принципів побудови логіко-імітаційних моделей: 1 – головна подія; 2...5 – проміжні події; 6 – базова подія

Кожну із подій моделі (“розкрита”, “не розкрита”, “головна”, “базова”, “подія-умова” тощо) зображують у вигляді символів: коло – базова подія з відповідними числовими даними; ромб – нерозкрита подія (подія, яка вимагає проведення відповідних досліджень); прямокутник – подія, що виникає як результат дії символу-оператора; овал – подія-умова, що використовується з оператором “Заборона”; хатка (п’ятикутник, в якого один з боків є основою), – подія, яка може відбутися або не відбутися; трикутник (рівносторонній трикутник) – символ перенесення.

Як приклад відобразимо процес розробки методики логічно-імітаційної моделі. Головну випадкову подію, модель якої нам необхідно побудувати, вибираємо виходячи з оцінки відповідного об’єкта, виробництва чи окремої одиниці обладнання і змісту його найбільш небезпечного явища, яке за певних умов виробництва може виникнути. Вибором головної події розпочинають побудову моделі. Використовуємо оператори «І» та «АБО» – виступають у ролі набору ситуацій, які можуть призвести до тієї події, яка вибрана як головна [7].

Також слід зазначити, що кожна випадкова подія, до якої входять базові події, може формуватися й виникати при входженні у неї двох, трьох і більше базових подій за допомогою відповідних операторів.

Після побудови та перевірки, модель підлягає математичному опрацюванню для визначення ймовірності кожної випадкової події, що увійшла до моделі, починаючи з базових і закінчуючи головною.

Ймовірності базових подій визначають за даними виробництва. Наприклад, базова подія «стан контролю з охорони праці». Для визначення ймовірності ми повинні встановити наскільки (%) від ідеального рівня здійснюється відповідний контроль на об’єкті. Якщо буде встановлено, що такий рівень контролю становить 50 або 30 %, то ймовірність відповідно дорівнює 0,5 і 0,3. При відсутності контролю ймовірність «не здійснення контролю» становитиме 1, якщо контроль ідеальний, то відповідна ймовірність дорівнює 0.

Після обчислення ймовірності всіх подій, розміщених у ромбах, і базових подій, починаючи з лівої нижньої гілки «дерева», позначають номерами всі випадкові події, що увійшли до моделі.

На цьому можна вважати, що певна модель підготовлена до математичної обробки. Для виконання математичних обчислень ймовірностей випадкових подій логіко-імітаційної моделі застосовують формули [3].

Побудуємо логіко-імітаційну модель процесу, формування і виникнення аварії та травми в процесі відновлення деталей подрібнюючих машин і складемо перелік базових подій. Кожній події (пункту) присвоюємо певне значення ймовірності його виникнення:

- | | |
|---|---------------|
| 1. Відсутність елементів системи | $P_6 = 0,19;$ |
| 2. Професійний рівень слюсаря | $P_1 = 0,25;$ |
| 3. Наявність дефектів | $P_8 = 0,15;$ |
| 4. Відсутність захистів | $P_7 = 0,13;$ |
| 5. Досвід роботи сервісного інженера | $P_2 = 0,18;$ |
| 6. Пошкодження елементів системи | $P_5 = 0,15;$ |
| 7. Психо-фізіологічний стан сервісного інженера | $P_3 = 0,13;$ |

Складені події дають можливість побудувати матрицю логічних взаємозв'язків між окремими пунктами.

Отже, розглядаємо травмонебезпечну ситуацію, яка може виникнути під час миття деталей двигуна та призвести до травмування працівника, а також зробимо розрахунок ймовірності виникнення подій, що формують логіко-імітаційну модель в процесі технічного сервісу машин .

Ймовірність виникнення події P_9 визначаємо наступним чином:

$$P_9 = 0,25 + 0,18 + 0,13 = 0,56;$$

Ймовірність виникнення події P_{10} визначаємо:

$$P_{10} = 0,19 \cdot 0,15 = 0,0285$$

Ймовірність виникнення події P_{11} визначаємо так:

$$P_{11} = 0,13 + 0,15 = 0,28;$$

Ймовірність події P_{12} :

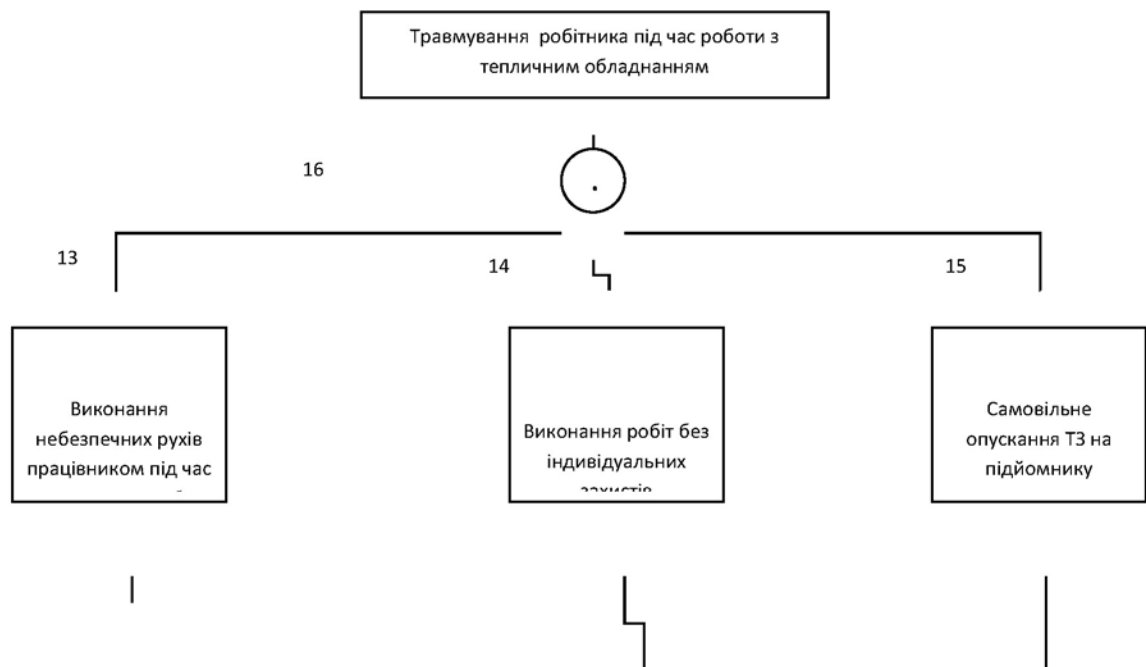
$$P_{12} = (0,25 + 0,18 + 0,13) \cdot 0,18 = 0,1008;$$

Ймовірність події P_2 :

$$P_2 = 0,1008 \cdot 0,0285 \cdot 0,28 = 0,000804;$$

За нашими розрахунками ймовірність виникнення травми працівника під час миття деталей дигуна є досить мала і становить $P_2 = 0,000804$.

Впровадження у практику підприємства логіко-імітаційних моделей дослідження аварій і травм, а також для обґрунтування заходів охорони праці, дають змогу знизити ймовірність виникнення аварійних та травмонебезпечних ситуацій.



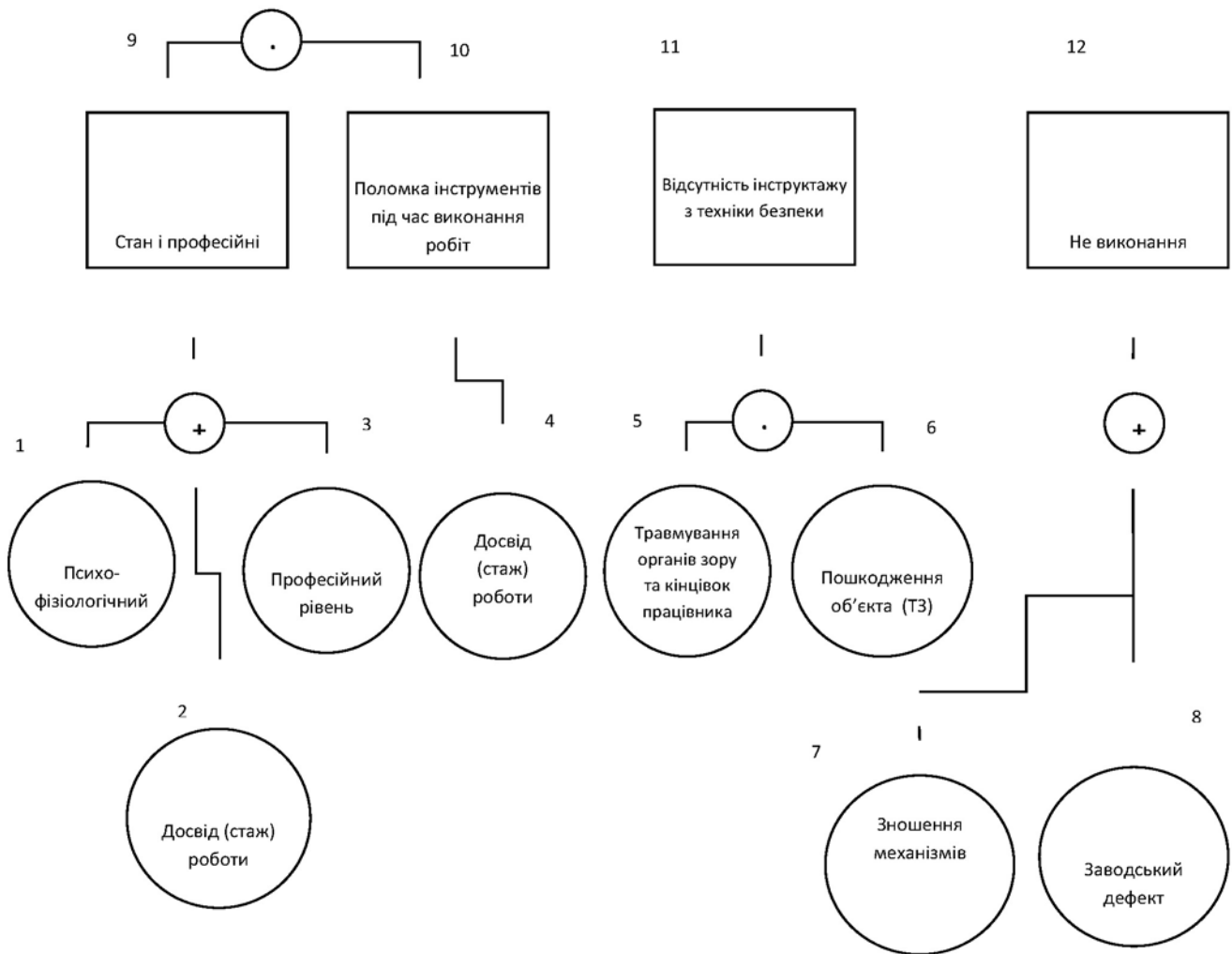


Рисунок 5.2 – Матриця логічних взаємозв'язків між окремими подіями травмонебезпечної ситуації

5.4. БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

В залежності від ефективності розроблення та особливо від впровадження у практику заходів із запобігання та ліквідації надзвичайної ситуації в разі її виникнення залежатиме життя та здоров'я персоналу та відвідувачів підприємств і розміри заподіяної шкоди.

Відповідно до Кодексу цивільного захисту України, підготовка персоналу на підприємствах незалежно від форм власності до дій у надзвичайних ситуаціях здійснюється за спеціально розробленою схемою заходів захисту населення та територій.

Виходячи з цього, ст. 130 Кодексу цивільного захисту України передбачає, що на підприємствах з чисельністю персоналу 50 осіб і менше розробляються та затверджуються інструкції щодо дій при загрозі або виникненні надзвичайних ситуацій [29].

Крім того, у сфері промислового виробництва до малих підприємств можуть бути віднесені і такі, де чисельність працівників перевищує 50 осіб. Інструкції для таких підприємств розроблюються за рішенням відповідного територіального органу Держслужби України з надзвичайних ситуацій.

Розроблена інструкція не повинна суперечити положенням та вимогам Кодексу цивільного захисту України.

Інструкція розробляється та підписується посадовою особою підприємства з питань цивільного захисту, затверджується керівником підприємства та доводиться до всіх працівників під підпис.

Крім інструкції, на малому підприємстві розробляється План евакуації при пожежі або загрозі вибуху. Особливо це важливо для тих об'єктів, на території яких може знаходитись значна кількість відвідувачів.

Деякі конкретні заходи, не відображені в нормативних документах підприємства, потребують внесення до посадових інструкцій працівників. Крім того, на малому підприємстві необхідно розробляти й доводити до всіх працівників "Порядок цілодобового оповіщення керівництва та працівників у випадку загрози або виникнення надзвичайної ситуації" [29].

Всі працівники підприємства повинні бути навчені діям, чітко знати свої обов'язки та неухильно їх виконувати. Це також стосується адміністрації

малого підприємства, яка в екстремальній обстановці не може приймати помилкові рішення або віддавати необґрунтовані розпорядження.

Уникнути цього дозволить якісно розроблена “Інструкція щодо дій персоналу малого підприємства при загрозі або виникненні надзвичайних ситуацій”.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Resh, H. M. (2022). *Hydroponic Food Production: A Definitive Guidebook for the Advanced Home Gardener and the Commercial Hydroponic Grower*. CRC Press.
2. Carotti, L., et al. (2021). "Root zone hypoxia and plant responses in soilless culture: A review." *Scientia Horticulturae*, 289, 110499.
3. Taiz, L., Zeiger, E. (2010). *Plant Physiology* (5th ed.). Sinauer Associates.432423
4. Основи гідропоніки. URL: // <https://shop.floragrowing.com/ua/a360402-gidroponika.html>42342
5. Глосарій термінів з хімії / укладачі: Й. Опейда, О. Швайка ; Ін-т фізико-органічної хімії та вуглехімії ім. Л. М. Литвиненка НАН України, Донецький національний університет. — Донецьк : Вебер, 2008. — 738 с. — ISBN 978-966-335-206-0.55
6. Калініченко, В. О. Гідропонні та аеропонні системи вирощування рослин: принципи побудови та перспективи розвитку // Наукові праці НУБіП України. — 2022. — №4. — С. 35–42.
7. Nguyen, D. T., & Lee, J. H. Development of an intelligent aeroponic system using IoT and machine learning // *Computers and Electronics in Agriculture*. — 2021. — Vol. 187. — Article 106252.
8. DOI: 10.1016/j.compag.2021.106252.
9. Islam, M. J., Rahman, M. M., & Hasan, M. R. Design and Implementation of an Automated Aeroponic System for Smart Agriculture // *International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA)*. — 2020. — Vol. 11, No. 5. — P. 215–222.

10. He, C., Li, X., & Zhang, Q. Optimization of nutrient misting intervals in aeroponics for lettuce growth // *Journal of Plant Nutrition*. — 2022. — Vol. 45(12). — P. 1762–1773.
11. Luna-Morales, C., & Ortega, R. Energy-efficient control strategies for aeroponic nutrient delivery systems // *Biosystems Engineering*. — 2023. — Vol. 228. — P. 151–163.
12. Барна, О. І., Мельник, С. Г. Автоматизація мікроклімату в установках аеропонного типу // *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. — 2021. — №5. — С. 48–53.
13. Al-Kodmany, K. Vertical Farming: Aeroponic and Hydroponic Technologies for Sustainable Urban Food Systems // *Sustainability*. — 2018. — Vol. 10(11). — Article 3770.
14. DOI: 10.3390/su10113770.
15. Шевченко, І. П. Мікроконтролерні системи моніторингу параметрів середовища в аеропонних установках // *Молодий вчений*. — 2022. — №3(103). — С. 112–117.
16. Bhattarai, S. P., Midmore, D. J. Aeroponics: A modern approach for vegetable seed production // *Horticultural Science (Prague)*. — 2020. — Vol. 47(1). — P. 1–11.
17. Тарасенко, Ю. М. Системи автоматизованого керування подачею живильного туману в аеропонних установках // *Енергетика та автоматика*. — 2021. — №4. — С. 59–65.
18. Resh, H. M. *Hydroponic Food Production: A Definitive Guidebook for the Advanced Home Gardener and the Commercial Hydroponic Grower*. — 8th ed. — CRC Press, 2022. — 574 p.

19. Li, J., Zhang, X., & Zhao, H. Simulation of air–nutrient interactions in high-pressure aeroponic systems // *Journal of Agricultural Engineering Research*. — 2024. — Vol. 109. — P. 89–98.
20. Коваленко, Р. В. Енергоефективність системи туманоутворення в установках аеропонного типу // *Сучасні технології в аграрному виробництві*. — 2023. — №2. — С. 41–47.
21. Pandey, R., & Singh, A. Sensor-based control in aeroponic systems for precision nutrient delivery // *Sensors*. — 2021. — Vol. 21(19). — Article 6542.
22. Choudhary, N., & Kumar, R. IoT-based monitoring and data analytics in aeroponics // *IEEE Access*. — 2023. — Vol. 11. — P. 17654–17666.78878
23. Hwang, J.-Y., et al. (2017). "Na-ion batteries: from fundamental research to engineering exploration." *Energy Storage Materials*, 6, 1-10.
24. Cabeza, L. F. (2021). *Advances in Thermal Energy Storage Systems: Methods and Applications* (2nd ed.). Woodhead Publishing.55
25. N'Tsoukpoe, K. E., et al. (2009). "A review on long-term sorption solar energy storage." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(9), 2385-2396.
26. Ремонт машин та обладнання. Підручник. За редакцією О.І. Сідашенка та О.І. Науменка. Харків 2010.
27. Лауш П. В. Ремонт сільськогосподарської техніки (курсове і дипломне проектування): Навч. посібник / П. В. Лауш, Н. П. Лауш, Т. П. Лесюк. — Кіровоград : ПОЛІМЕД-Сервіс, 2005.
28. Основи наукових досліджень. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт №2 і №3 для студентів факультету механізації сільського господарства. Львів. 1998.

29. Охорона праці. Методичні рекомендації до виконання розділу з охорони праці у дипломних проектах. Львівський національний аграрний університет, 2012 р.
30. Awad S.B. (2011) High-Power Ultrasound in Surface Cleaning and Decontamination. In: Feng H., Barbosa-Canovas G., Weiss J. (eds) Ultrasound Technologies for Food and Bioprocessing. Food Engineering Series. Springer, New York, NY. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7472-3_21
31. . F.J. Fuchs. Ultrasonic Cleaning Fundamental Theory and Application. New York Applications Engineering, Blackstone-Ney Ultrasonics Inc., 2002.
32. Ремонт машин. Методичні поради до курсового і дипломного проектування: у 2-х частинах/ За аг. Ред.. академіка О.Д. Семковича. – Частина1 та 2. Львів : Львів. держ. агр. ун-т, 1997.
33. Dem'yanushko, I.V., Kazantsev, V.F., Karagodin, V.I. et al. Tools for Ultrasound Cleaning. Russ. Engin. Res. 37, (2017).
34. T.J. Mason, Ultrasonic cleaning: an historical perspective, Ultrason. Sonochem. (2016).
35. В.С. МОРКУН., д-р техн. наук, проф., О.М. КРАВЧЕНКО, асп. Криворізький національний університет. Основні напрямки вдосконалення керування процесом ультразвукового очищення. Вісник Криворізького національного університету, вип. 49, 2019.
36. Стеблюк М.І. Цивільна оборона. Київ: Урожай. 1994.
37. Барковський В.В., Барковська Н.В., Лопатін О.К. Теорія ймовірностей та математична статистика. м. Київ Видавництво “Центр учбової літератури”, 2009.
38. Хітров І.О., Гавриш В.С. Ремонт машин і обладнання. Навчальний посібник. – Рівне: НУВГП, 2012.

39. Кармазін В.В., Семенець В.В, Курс загальної фізики. М Київ Видавничий дім "КОНДОР" 2016.
40. B.Verhaagen, D.F. Rivas. Measuring cavitation and its cleaning effect. Ultrason. Sonochem. 29 (2016).