

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Факультет тваринництва та водних біоресурсів

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ
Завідувач кафедри аквакультури

(назва кафедри)

Бех В.В.

(підпис)

(ПІБ)

“ ”

2025р.

БАКАЛАВРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему Методи та прийому маніпуляцій середовищами для оптимізації
аквапонічної системи

Спеціальність 207 – «Водні біоресурси та аквакультура»

(код і назва)

Гарант освітньої програми

К.С.-Г.Н., ДОЦЕНТ

(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Хижняк М.І.

(ПІБ)

Керівник бакалаврської
кваліфікаційної роботи

К.С.-Г.Н., ДОЦЕНТ

(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Кононенко І.С.

(ПІБ)

Виконала

·
(підпис)

·
(ПІБ студента)

Бегаль Ю. С

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

Факультет тваринництва та водних біоресурсів

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри аквакультури

(назва кафедри)

Д.С.-Г.Н., професор

(науковий ступінь, вчене звання)

Бех В.В.

(підпис)

(ПІБ)

« »

2024 року

ЗАВДАННЯ

на виконання випускної бакалаврської роботи студентці

Бегаль Юлії Сергіївни

(прізвище, ім'я по батькові)

Спеціальність 207 – «Водні біоресурси та аквакультура»

(код і назва)

Тема бакалаврської кваліфікаційної роботи «Методи та прийоми балансування систем аквапоніки для органічного вирощування продукції», затверджена наказом ректора НУБіП України від “25 жовтня” 2024 р. № 1912 «С»

Термін подання завершеної роботи (проєкту) на кафедру «15» травня 2025 р.
(рік,місяць, число)

Вихідні дані до бакалаврської кваліфікаційної роботи: наукові статті, публікації вітчизняних та іноземних авторів, присвячені аквапонічним системам, інформація з офіційних вебресурсів компаній-виробників обладнання для аквапоніки, а також аналітичні матеріали профільних організацій і спільнот, включаючи звіти та рекомендації Міністерства аграрної політики та продовольства України щодо розвитку органічного виробництва та аквакультури.

Перелік питань, які потрібно розробити: проаналізувати літературні джерела щодо принципів роботи аквапонічних систем, їх компонентів і сучасних технологій управління середовищами; розглянути конструктивні рішення та технологічні підходи до влаштування та використання освітлення, регулювання температури, якості та фільтрації води в аквапоніці; вивчити особливості функціонування основних середовищ у системі аквапоніки: тваринного, рослинного та бактеріального; проаналізувати вплив світла, субстратів і кормів на стан середовища й ріст рослин у замкненій системі; дослідити особливості

підтримання балансу у водному середовищі шляхом фільтрації та біологічного очищення.

Перелік графічних документів: рисунки, таблиці

Дата видачі завдання “ 12 ” листопада 2024 р.

**Керівник бакалаврської
кваліфікаційної роботи**

(підпис)

Кононенко І.С.
(прізвище та ініціали)

**Завдання прийняв до
виконання**

(підпис)

Бегаль Ю.С.
(прізвище та ініціали студента)

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ	6
ВСТУП	8
РОЗДІЛ I. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ЗА ТЕМОЮ РОБОТИ	10
1.1. Аквапоніка – інтегрована технологія вирощування товарної продукції	10
1.2 Конструктивні рішення та технологічні підходи до аквапонічної системи	17
1.2.1. Світло та добовий цикл.....	19
1.2.2. Температура води та оточуючого середовища.....	20
1.2.3. Моніторинг якості води.....	24
Висновки з огляду літератури	27
РОЗДІЛ II. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ	29
РОЗДІЛ III. РЕЗУЛЬТАТИ ВЛАСНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	31
3.1. Середовища, що забезпечують функціонування системи аквапоніки.....	31
3.1.1. Тваринна складова аквапонічної системи.....	32
3.1.2 Рослинна складова аквапонічної системи.....	37
3.1.3. Бактеріальне середовище в аквапонічній системі.....	42
3.2. Світло як складова аквапоніки та спосіб регулювання росту рослин.....	43
3.3. Субстрати в аквапонічних системах для росту рослин	48
3.4. Корми для риби, як аспект впливу на середовище аквапоніки	51
3.5. Особливості фільтрації води в аквапоніці для забезпечення балансу системи.....	56
РОЗДІЛ IV. ОХОРОНА ПРАЦІ	59
ВИСНОВКИ	62
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	64

РЕФЕРАТ

Бакалаврська кваліфікаційна робота виконана на актуальну для галузі аквакультури тему: «Методи та прийоми маніпуляцій середовищами для оптимізації аквапонічної системи». Робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаної літератури та додатків.

Загальний обсяг роботи становить 67 сторінок друкованого тексту, вона містить 8 рисунків, 5 таблиць і 37 джерел інформації з вітчизняних та іноземних наукових публікацій.

Актуальність теми. У зв'язку зі зростаючим попитом на екологічно чисту продукцію та необхідністю сталого використання водних ресурсів, аквапоніка виступає перспективним напрямом інтегрованого вирощування риби та рослин. Це дозволяє ефективно використовувати воду, зменшувати забруднення довкілля та отримувати біологічно безпечну продукцію. Для стабільного функціонування аквапонічних систем необхідно чітко контролювати параметри середовища, що забезпечує життєдіяльність усіх її компонентів — тваринного, рослинного та бактеріального. . Оптимізація параметрів середовища дозволяє підвищити ефективність виробництва та зменшити навантаження на довкілля, що робить дослідження надзвичайно актуальним у сучасних умовах.

Мета роботи. Дослідити та проаналізувати методи і прийоми маніпуляцій середовищами в аквапонічних системах з метою оптимізації росту та розвитку рослин і риб. Робота спрямована на визначення ефективних підходів до регулювання параметрів середовища, що дозволяє покращити продуктивність системи та забезпечити її стабільне функціонування.

Об'єкт дослідження: замкнена аквапонічна система, яка об'єднує вирощування гідробіонтів (переважно риб) та рослин у єдиному циркуляційному середовищі. Особлива увага приділяється характеристикам водного середовища та субстратів для рослин.

Методи дослідження: загальнонаукові методи аналізу та синтезу, методи порівняння і узагальнення наукової інформації.

Завдання роботи:

- проаналізувати літературні джерела щодо принципів роботи аквапонічних систем, їх компонентів і сучасних технологій управління середовищами;
- розглянути конструктивні рішення та технологічні підходи до влаштування та використання освітлення, регулювання температури, якості та фільтрації води в аквапоніці;
- вивчити особливості функціонування основних середовищ у системі аквапоніки: тваринного, рослинного та бактеріального;
- проаналізувати вплив світла, субстратів і кормів на стан середовища й ріст рослин у замкненій системі;
- дослідити особливості підтримання балансу у водному середовищі шляхом фільтрації та біологічного очищення.

Практичне значення отриманих результатів: дослідження дозволяє обґрунтувати доцільність використання аквапоніки в умовах обмежених водних ресурсів як ефективного методу для вирощування риби й рослин. Робота спрямована на популяризацію інноваційних екологічних технологій, що можуть бути впроваджені в аграрному секторі України.

Ключові слова: *аквапоніка, система, субстрати, рослини, риби, освітленість, комбікорми, температура, водне середовище.*

ВСТУП

Зростаючий попит на екологічно чисту продукцію та необхідність сталого використання водних ресурсів стимулює пошук нових методів та підходів до їх впровадження, і в даному випадку система аквапоніки виступає перспективним напрямом інтегрованого вирощування риби та рослин. Це форма організації виробництва, що дозволяє ефективно використовувати воду, зменшувати забруднення довкілля та отримувати біологічно безпечну продукцію. Однак, для стабільного функціонування аквапонічних систем необхідно чітко контролювати параметри середовища, що забезпечує життєдіяльність усіх її компонентів – тваринного, рослинного та бактеріального. Водночас, оптимізація параметрів середовища дозволяє підвищити ефективність виробництва та зменшити навантаження на довкілля, що робить дослідження надзвичайно актуальним у сучасних умовах.

Система аквапоніки сприяє економії водних і просторових ресурсів, а також зменшенню використання хімічних добрив та інших засобів. Однак для її успішного функціонування необхідно детально вивчити взаємодію між рибами, рослинами та мікроорганізмами. Ключовим аспектом в даному випадку є контроль параметрів середовища – температури, освітлення, якості води, кормів і субстратів, що в сукупності забезпечує стабільність і продуктивність системи загалом.

Саме тому, **актуальність даного дослідження** зумовлена потребою вдосконалення методів регулювання біологічних і фізико-хімічних процесів в аквапоніці для забезпечення гармонійного балансу всіх її компонентів. Це сприятиме здоров'ю риб, оптимальному росту рослин і загальній мікробіологічній стабільності.

Для досягнення мети було поставлено такі **завдання**:

- проаналізувати літературні джерела щодо принципів роботи аквапонічних систем, їх компонентів і сучасних технологій управління середовищами;

- розглянути конструктивні рішення та технологічні підходи до влаштування та використання освітлення, регулювання температури, якості та фільтрації води в аквапоніці;
- вивчити особливості функціонування основних середовищ у системі аквапоніки: тваринного, рослинного та бактеріального;
- проаналізувати вплив світла, субстратів і кормів на стан середовища й ріст рослин у замкненій системі;
- дослідити особливості підтримання балансу у водному середовищі шляхом фільтрації та біологічного очищення;

Об'єктом дослідження була замкнена аквапонічна система, яка об'єднує вирощування гідробіонтів (переважно риб) та рослин у єдиному циркуляційному середовищі. Особлива увага приділяється характеристикам водного середовища та субстратів для рослин.

РОЗДІЛ I. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ЗА ТЕМОЮ РОБОТИ

1.1. Аквапоніка – інтегрована технологія вирощування товарної продукції

Продовольство або харчова продукція завжди були і залишаються життєво необхідним ресурсом для людства, а тому сфера сільського господарства буде зберігати свою актуальність у всі часи.

Водночас, розвиток суспільства та технологій спрямований на підвищення ефективності виробництва, зменшення витрат енергії та раціональне використання природних ресурсів, зокрема води. Саме тому людство постійно шукає нові рішення для оптимізації процесів, створюючи інноваційні технології, що забезпечують стабільне виробництво продуктів харчування при мінімальному впливі на довкілля. Особлива увага при цьому приділяється екологічним аспектам: зниженню забруднення ґрунтів, раціональному водокористуванню та збереженню природних екосистем. Одним із перспективних підходів, що відповідає цим вимогам, та може бути підтримкою для одних з цих нагальних глобальних проблем, є аквапоніка – технологія, яка поєднує вирощування рослин та риби у єдиній системі, враховуючи особливості організації якої з'являється можливість вирощування екологічно чистої продукції з використанням ресурсоефективного виробництва. Так, представлений метод сприяє збереженню ресурсів, зменшуючи потребу в хімічних пестицидах і добривах, одночасно пом'якшуючи деградацію ґрунтів та забруднення води [6].

Аквапоніка не є сучасним винаходом, його коріння можна простежити до стародавніх цивілізацій. Один із найдавніших відомих прикладів походить від ацтеків, які розробили чинампаси – системи плавучих садів, що поєднували рибицтво та вирощування сільськогосподарських культур (рис. 1.1). У Південно-Східній Азії рисові поля часто зариблювали рибою, створюючи природну систему аквапоніки. Заболочені землі навколо оз. Тескоко не були

придатними для традиційного землеробства, тому ацтеки створили штучні плавучі острови з очерету та мулу, піднятого з дна озера. Ці “плавучі сади” отримували поживні речовини з водойми, що дозволяло вирощувати культури без потреби в орних землях [34].

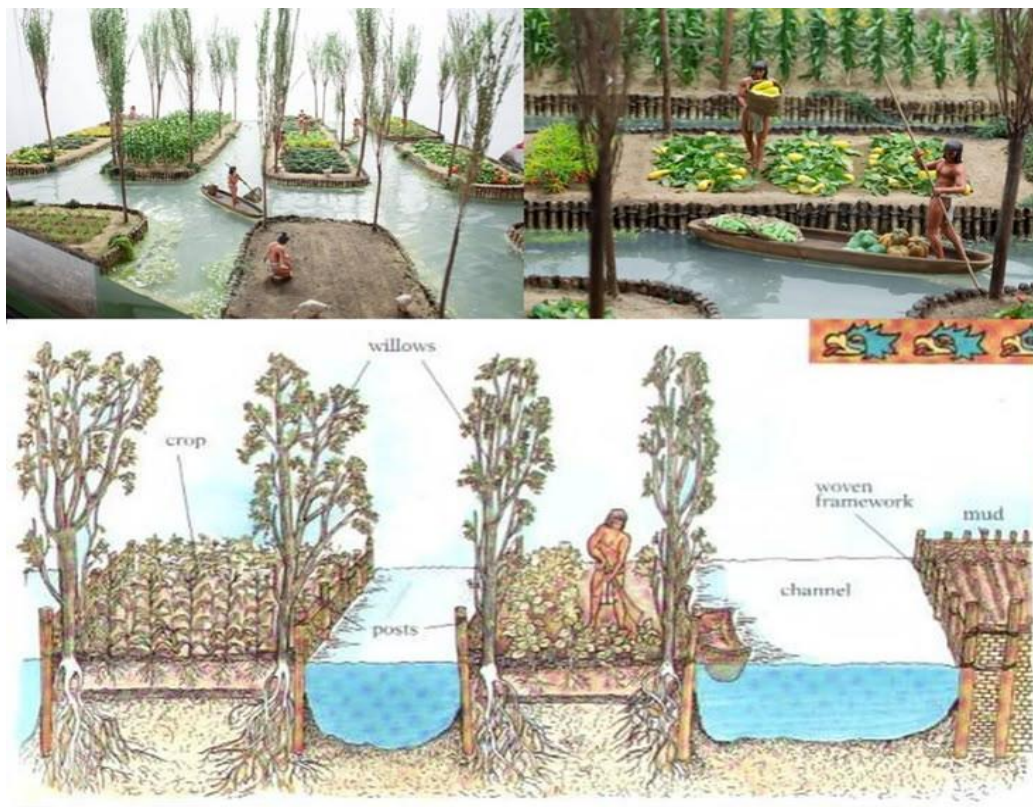


Рис. 1.1 Сучасне уявлення про вигляд чинампасів

Сучасна аквапоніка почала розвиватися у 1970-х роках, коли рибоводи почали експериментувати з використанням водних і наземних рослин для очищення води у системах розведення риб. Відомо, що у традиційній аквакультурі значний обсяг чистої води потрібен для розведення водних організмів, а також для регулярного виведення відходів. Однак при вирощуванні риб за високих щільностей виникають дві основні проблеми:

1. забруднення води через накопичення органічних відходів (нез’їденого корму, екскрементів та продуктів життєдіяльності риб тощо).
2. вразливість до хвороб і стресу через високу щільність посадки, що вимагає застосування антибіотиків та хімічних речовин.

Таким чином, рибоводи почали вирішувати ці проблеми, перевіряючи, чи можуть рослини ефективно поглинати надлишкові поживні речовини з води, тим самим очищуючи її. Це значно скорочувало необхідність регулярної заміни води в системах розведення риб. Успішні експерименти спершу проводилися ентузіастами та підприємцями, а згодом до них долучилися наукові установи та дослідницькі центри.

І ось останні десятиліття дана технологія переросла в комерційні аквапонічні ферми, які дозволяють цілорічно отримувати екологічно чисту продукцію – як рибну, так і рослинну. Вже сьогодні аквапонічні господарства активно розвиваються у США, Австралії, Канаді, Великій Британії, Німеччині, Мексиці, В'єтнамі, Швейцарії та інших країнах [34].

Досить цікавим та водночас складним є сам процес аквапоніки – це симбіотична комбінація аквакультури та гідропоніки, де рослини культивуються у воді, збагаченій рибними відходами, а риби вирощуються у воді, очищеній рослинами, створюючи замкнуту систему. Сьогодні аквапоніка широко поширена через її потенціал для виробництва як риби, так і овочів у взаємовигідній системі, сприяючи розвитку сталих методів сільського господарства та стимулюючи зусилля щодо забезпечення продовольчої безпеки.

Порівнюючи з традиційними методами вирощування рослин та риби, аквапоніка має значні переваги що робить її перспективною технологією у сфері сільського господарства. Виділимо основні.

1. *Мінімальне споживання води.* Система може зберегти до 90,0% води, оскільки вона постійно циркулює та очищується, що знижує залежність від джерел водопостачання. На відміну від традиційного землеробства, вода не витрачається через випаровування та просочування в ґрунт.

2. *Відсутність потреби у добривах.* Поживні речовини для рослин надходять із відходів життєдіяльності риб, що робить систему екологічно чистою та економічно вигідною. Це усуває необхідність використання мінеральних та органічних добрив. Система забезпечує отримання органічних

продуктів, що відповідають зростаючим вимогам споживачів, які шукають безпечну та якісну продукцію без шкідливих домішок.

3. *Зменшення витрат на працю.* Вирощування рослин без ґрунту знижує трудомісткість процесу, оскільки відсутні традиційні агротехнічні операції, такі як оранка, розпушування, боротьба з бур'янами та інше. Основними роботами залишаються висадка та збирання врожаю.

4. *Біологічний контроль шкідників.* Аквапонічні системи найчастіше розміщуються в закритих приміщеннях (теплицях), що дозволяє ефективно контролювати середовище та знижувати ризик зараження хворобами і шкідниками без використання пестицидів.

5. *Економічна вигода.* Як вже зазначалось вище, відсутні витрати на пестициди, добрива, паливо для сільськогосподарської техніки, що робить аквапоніку привабливою альтернативою традиційним методам ведення сільського господарства.

6. *Енергоефективність.* Підтримання екологічної рівноваги в системі потребує мінімальних зовнішніх енергетичних ресурсів, зокрема для роботи насосів та аераторів, що робить дану систему максимально комфортною у використанні та впливає на кінцеву собівартість продукції.

7. *Різноманітність вирощуваних видів.* В аквапоніці можна вирощувати широкий спектр водних організмів (тіляпія, форель, сом, вугор, короп, раки, декоративні види) та рослин (салат, морква, базилік, селера, томати, шпинат, капуста, перець, полуниця тощо), що робить дану систему привабливою для зацікавлених осіб.

8. *Висока продуктивність.* Аквапоніка поєднує вирощування риби та рослин в єдиній замкненій екосистемі, що дозволяє отримувати два види продукції одночасно. Завдяки постійному доступу рослин до поживних речовин та оптимальним умовам для росту, їхній розвиток відбувається швидше, ніж у традиційному землеробстві. Також аквапонічна система забезпечує стабільні умови для розведення риби, що сприяє їхньому швидкому росту та високій

врожайності. Це робить технологію надзвичайно ефективною з точки зору використання ресурсів та збільшення обсягів виробництва на одиницю площі [4].

Попри значні переваги, у аквапонічних системах присутні і певні недоліки, які можуть частково обмежувати рівень впровадження та ефективність даної системи.

1. *Висока вартість початкових інвестицій.* Запуск аквапонічної системи потребує досить значних фінансових вкладень на спорудження, закупівлю обладнання (різних резервуарів, якісних насосів, фільтрів, систем аерації тощо) та створення інфраструктури для підтримання стабільної роботи системи.

2. *Витрати на енергію.* Для забезпечення ефективного функціонування системи потрібне постійне забезпечення циркуляції води, її аерація та підтримання оптимальної температури, що призводить до високих витрат електроенергії. У регіонах із нестабільним енергопостачанням це може бути серйозною проблемою, оскільки навіть короткочасне відключення електрики може негативно вплинути на риб і рослини. В даному випадку потрібно продумати альтернативне джерело електроенергії, щоб забезпечити виживаність вирощуваних об'єктів.

3. *Потреба постійного контролю.* Підтримання екосистеми аквапоніки в стабільному стані потребує ретельного моніторингу основних параметрів, зокрема вмісту кисню, рівнів аміаку, нітратів, рН води та температури. Для цього потрібні спеціалізовані датчики, інструменти та сенсори, крім того необхідна постійна увага оператора системи.

4. *Складність керування.* Успішна діяльність аквапонічного господарства вимагає знань у двох різних сферах – аквакультури та гідропоніці (вирощуванні рослин без ґрунту). Недостатні знання у будь-якій із цих сфер може призвести до дисбалансу системи та зниження продуктивності. Саме тому важливою умовою є наявність висококваліфікованого спеціаліста із освітою, відповідними знаннями та навичками.

5. *Потреба в додатковому обладнанні.* Незважаючи на те, що аквапоніка не потребує важкої сільськогосподарської техніки, вона вимагає використання різноманітного обладнання для підтримання водообміну, фільтрації та аерації. Це може ускладнити обслуговування системи та підвищити витрати на її підтримання.

6. *Висока вартість розширення.* Аквапоніка звісно може працювати у великих масштабах, але комерційне виробництво вимагає значного капіталу. Обладнання та площа для великого аквапонічного підприємства коштують дорожче, ніж традиційне фермерське господарство аналогічного масштабу [18].

Незважаючи на зазначені недоліки, аквапоніка залишається перспективною технологією для сталого сільського господарства, особливо в умовах обмежених водних ресурсів та зростаючого попиту на органічні продукти.

Аквапоніка – це водночас складна, але проста система, що об'єднує різні компоненти та біологічні процеси створюючи стійку екосистему (рис. 1.2). Розуміння того, як працює аквапоніка, передбачає розгляд як фізичної установки, так і природних циклів, які у ній відбуваються.

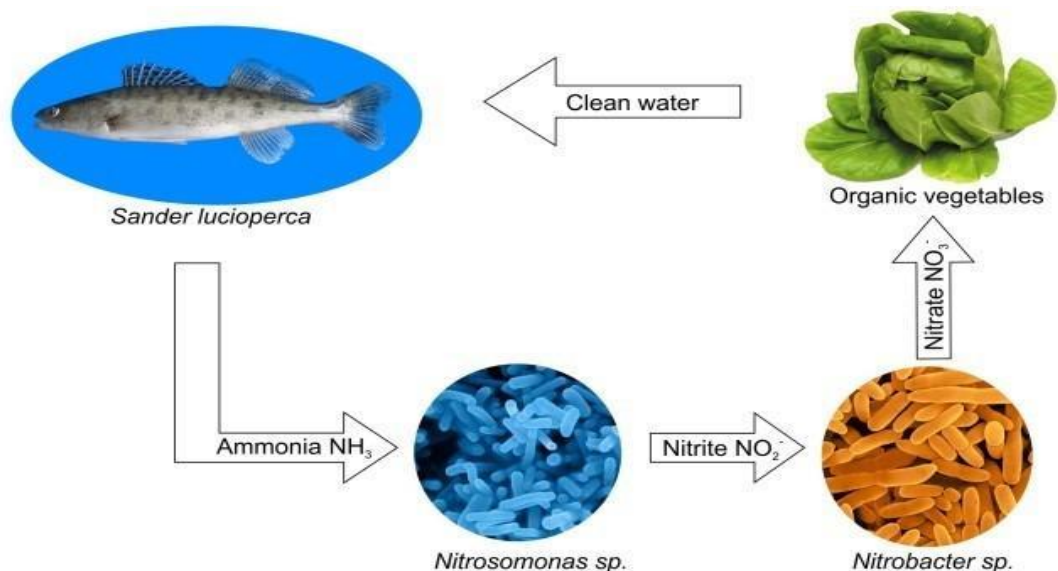


Рис. 1.2. Принцип роботи аквапонічної системи

Біологія аквапоніки полягає у наступному.

1. *Потрапляння відходів риб.* Водні організми (риби) виділяють переважно відходи у формі аміаку – побічного продукту їх метаболізму, що часто є причиною виникнення хвороб риб. Аміак є токсичним для них на високих рівнях, тому його потрібно ефективно видаляти з води. Однак у системі аквапоніки ці відходи і є початковою точкою кругообігу поживних речовин, що приносить користь рослинам.

2. *Перетворення аміаку на нітрати завдяки бактеріям (процес нітрифікації).* Корисні бактерії відіграють вирішальну роль в аквапоніці, перетворюючи токсичний аміак на менш шкідливі нітрати, процес, відомий як нітрифікація, що відбувається в два етапи:

- бактерії *Nitrosomonas*: ці бактерії перетворюють аміак (NH_3) на нітрити (NO_2^-), які все ще токсичні для риб, але менш токсичні, ніж аміак.
- бактерії *Nitrobacter*: вони потім перетворюють нітрити в нітрати NO_3^- , що є набагато менш токсичним та є основними поживними речовинами для рослин.

Ці бактерії осідають на поверхні всередині системи, особливо в середовищі для вирощування та біофільтрах. Формування міцної, стабільної бактеріальної колонії є ключовим для стабільності та ефективності системи [6].

3. *Поглинання поживних речовин рослинами.* Рослини поглинають нітрати та інші поживні речовини з води через своє коріння. Засвоюючи їх, таким чином вони очищують та фільтрують воду, яка після цього знову повертається в ємність з рибою. Це поглинання поживних речовин сприяє росту і продуктивності рослин, що дозволяє вирощувати широкий спектр культур. Вибір рослин може варіюватися від листової зелені та трав до плодівих овочів, залежно від конструкції системи та умов навколишнього середовища [4].

Таким чином, принцип роботи аквапонічної системи ґрунтується та формується на ефективному взаємозв'язку, симбіозі між рибами, бактеріями та рослинами, що забезпечує сталий і екологічно чистий процес вирощування

товарної продукції. Як показано на рисунку 1.2, кожен елемент цієї системи взаємодіє, сприяючи підтриманню оптимальних умов для розвитку всіх учасників процесу, що забезпечує стабільність та високу продуктивність аквапоніки.

1.2 Конструктивні рішення та технологічні підходи до аквапонічної системи.

Аквапоніка система – це інтегрована екосистема, в якій, як вже було зазначено вище, в симбіотичних відносинах перебувають три основні компоненти – риби, бактерії та рослини, забезпечуючи ефективний кругообіг поживних речовин. Для ідеального її функціонування слід створити оптимальні умови, що підтримували б стабільність системи, підвищення продуктивності та мінімізацію витрат ресурсів. Для цього повинні бути внесені конструктивні компетентні рішення та технологічні підходи. Тому при монтажі та встановленні системи для гармонійної роботи всіх її компонентів потрібно грамотно та відповідально підійти до даного питання. Так, компетентно розроблена система повинна бути продуктивна, енергоефективна та проста в обслуговуванні. Основними факторами, які повинні бути враховані при проектуванні, є:

- вибір матеріалів для конструкцій: вони мають бути якісними, нетоксичними та стійкими до водного середовища;
- забезпечення ефективного водообміну та циркуляції (для того, щоб розподіл речовин здійснювався рівномірно);
- підтримання стабільного середовища для риб, бактерій та рослин через фільтрацію, аерацію та контроль параметрів води;

До ключових елементів, що забезпечують функціонування аквапоніки можна віднести:

1. Ємність для риб, як основа всієї системи. Вона повинна бути достатнього розміру, забезпечувати належну аерацію та циркуляцію води, а також бути виготовленою з нетоксичних матеріалів.

2. Пристосування для вирощування рослин. Вони можуть бути виготовлені з пластику (харчового нетоксичного), металу або дерева. Важливо, щоб даний матеріал був міцним, водостійким та безпечним для використання.

3. Насоси, які необхідні для транспортування води між ємністю та пристосуваннями для рослин. Додатково використовуються повітряні насоси для забезпечення достатнього рівня кисню у воді.

4. Фільтраційна система, що включає механічні фільтри, які видаляють тверді відходи (екскременти риб, залишки корму тощо), запобігаючи забрудненню води; біофільтри – місце проживання нітрифікуючих бактерій, які перетворюють аміак на нітрати, необхідні для живлення рослин.

5. Система трубопроводів. Шланги та труби забезпечують циркуляцію води між компонентами та плавний потік води в системі. Вони теж обов'язково мають бути виготовлені з міцних, стійких до вологи матеріалів.

6. Системи регулювання умов навколишнього середовища. Контроль, такий параметрів як освітлення, температура та ін., що включає лампи різних спектрів, підігрівачі, термометри, термостати [6].

При проектуванні системи аквапоніки важливо також враховувати оптимізацію простору, забезпечуючи стратегічне розміщення всіх компонентів та факторів. Наприклад, якщо використовувати вертикальні конструкції – це дозволить більш ефективно використовувати площу та збільшити кількість посадкових місць. Доступ до всіх елементів системи має бути зручним для обслуговування – годівлі риби, перевірки параметрів водного середовища та збору врожаю. Також важливим компонентом є циркуляція води, яка запобігає застою, засміченню та непередбаченим зворотнім потокам. Водночас, використання гравітаційного принципу може спростити конструкцію та зменшити потребу в додаткових насосах. Для закритих приміщень або теплиць варто передбачити систему контролю температури, вологості та освітлення, а для зовнішніх систем – захист від несприятливих погодних умов [17].

1.2.1. Світло та добовий цикл. Одним із важливих аспектів, що впливають на ефективність аквапонічних систем, є забезпечення належного освітлення. Добре відомо, що світло відіграє ключову роль у фотосинтезі, який забезпечує оптимальні умови для росту рослин в умовах обмеженого природного освітлення, що характерно для закритих приміщень.

Недотримання належних вимог щодо освітлювальних систем, потрібних для вирощування рослин в аквапоніці, може спричинити значні марні витрати ресурсів, як фінансових, так і фізичних, витрачених на її налаштування та створення. Також невідповідне світло може серйозно вплинути на риб, та спричинити проблеми в системі, викликаючи стрес, гальмуючи ріст у риб, і навіть знищуючи корисні бактерії, які повинні здійснювати процес нітрифікації. [9].

Добре відомо, що для ідеального росту рослин необхідний чіткий добовий цикл, тобто чергування світла і темряви (дня і ночі). У природі сонячне світло допомагає рослинам виробляти енергію вдень через фотосинтез, а вони розщеплюють та перетворюють цю енергію для процесу свого росту, цвітіння та формування плодів. Проте варто обов'язково враховувати, що різні рослини потребують різної кількості світла, навіть в різні періоди свого росту та розвитку. Овочі та квітучі рослини, наприклад, потребують від 12,0 до 16,0 год сонячного світла/день. Водночас, рослини також потребують темряви, тривалість якої має становити щонайменше 8,0 год. Моніторинг і спостереження за ростом та станом рослин дозволяють отримати інформацію щодо того, чи достатньо їм світла, чи забагато. Особливо важливо враховувати тип світла, яке використовуються в аквапоніці, оскільки існують такі як світлодіодні (LED), флуоресцентні та газорозрядні лампи. Кожен з цих типів має свої переваги в залежності від потреб рослин у світлі. Наприклад, світлодіодні лампи є енергоефективними та мають широкий спектр, що підходить для рослин різних видів, в той час як флуоресцентні лампи можуть бути більш доступними для невеликих систем.

Проте, забезпечення певного спектру освітлення повинне враховуватись не лише для рослин, які ми вирощуємо, а для всіх об'єктів цього симбіозу, тобто і для риб і бактерій також. Для різних видів риб потрібні різні умови освітлення. Деяким потрібно світло для нормального та здорового росту, тоді як інші процвітають у більш затемнених умовах. Важливо, щоб риби також мали періоди темряви для відпочинку, тому регулярний світловий цикл допомагає зменшити стрес у них та покращити їхній розвиток. Надлишок світла або відсутність темряви може призвести до порушення природного циклу риб, зниження їхнього апетиту або навіть хвороб [13].

А щодо бактеріальної складової, як я зазначала, то для росту нітрифікуючих бактерій світло не потрібне. Вони можуть виживати і без освітлення. Але все ж таки треба відмітити, що надмірне ультрафіолетове світло або інтенсивне синє світло може впливати на їхню активність, особливо на ті види бактерій, які є чутливими до світлових умов. Вони можуть бути пригнічені або загинути за умов високої інтенсивності світла, тому важливо вести контроль, та моніторинг світлового циклу, щоб забезпечити здоров'я усіх компонентів системи.

У загальному, для риб важливий баланс світла та темряви для підтримання природних ритмів, для бактерій – світло не має критичного впливу, але надмірна його кількість може бути шкідливою, а для рослин світло є основним фактором для фотосинтезу, тому його інтенсивність і спектр повинні бути підібрані з урахуванням потреб для кожного представника.

1.2.2. Температура води та оточуючого середовища. Підтримання оптимального середовища проживання виду має першочергове значення для ефективності його росту та розвитку. Деякі параметри, які є критичними, повинні залишатися сталими: температура, неіонізований аміак і нітрити, концентрації DO і CO₂, рН і швидкість гідравлічного навантаження (HLR), тобто швидкість потоку води.

Для вирощування та виробництва рослин температура води важливіша, ніж температура повітря. Температура води залежить від температури навколишнього середовища, і менші системи втрачають тепло швидше, ніж великі. Температурний діапазон для більшості рослин знаходиться в межах 18,0–30,0°C, однак оптимальний – в діапазоні 21,0–24,0°C. Ця температура дозволяє їм ефективно отримувати поживні речовини з води, ефективно фотосинтезувати та давати рясний урожай. Температури поза цим діапазоном можуть сповільнити ріст, обмежити поглинання поживних речовин і навіть пошкодити коріння [2].

Для вирощування риби потрібен певний діапазон температур води, який вони можуть переносити, проте для кожного виду цей діапазон може варіюватись по різному. Саме тому, для аквапоніки важливо підбирати види риб, температурний діапазон вирощування яких знаходиться в межах температурної толерантності рослин. Водночас, підвищення температури води та рН призведе до збільшення концентрації токсичного NH_3 . Підтримання постійної оптимальної температури води шляхом нагрівання або охолодження є досить важливою частиною екологічного менеджменту в аквапонічних системах.

Вода служить джерелом життя системи аквапоніки, яка здійснює обмін речовин між рибами, рослинами та бактеріями, транспортуючи необхідні поживні речовини від рибних відходів до коренів рослин, де вони поглинаються та використовуються для росту. Вода також відіграє вирішальну роль у видаленні відходів, забираючи надлишки поживних речовин і метаболічних побічних продуктів від риб і бактерій.

Для нітрифікуючих бактерій температура води теж відіграє важливу роль, оскільки лише за оптимальних умов вони перетворюють шкідливий аміак з рибних відходів у форму, придатну для використання рослинами (нітрати). Ці бактерії чутливі до температури. У діапазоні 17,0–34,0°C вони енергійні, ефективні та швидко перетворюють відходи. Але за межами цього діапазону їх активність сповільнюється. Нижче 10,0°C їх продуктивність різко падає, і може призвести до накопичення аміаку та завдати шкоди вашим рослинам і риbam [26].

І серед цього всього найважливішим є баланс системи. Звичайно, хотілось би досягнути діапазону, який буде виграшним для всіх, але інколи виникає потреба визначити пріоритети. Наприклад, деякі види риб можуть віддавати перевагу трохи нижчим температурам, ніж оптимальний діапазон для бактерій. У таких випадках дуже важливо вибрати вид риби, яка витримує більш широкий діапазон температур. Висока температура води може негативно впливати на всі компоненти аквапонічної системи: рослини, риби та корисні бактерії. Якщо температура підвищується, це може спричинити низку проблем у кожного з цих елементів.

Наприклад, температура води може бути зависокою, і на кожен компонент в системі аквапоніки він буде впливати по іншому. При її підвищенні знижується кількість розчиненого кисню, що є критично важливим для дихання риб. Це створює стресове середовище, що впливає на їхнє здоров'я та розвиток. Риби стають млявими, втрачають апетит і частіше ховаються. Такий стан послаблює їх і робить більш вразливими до захворювань.

Для рослин теж є негативні сторони, підвищена температура порушує їх водопоглинання, що може призвести до в'янення листя. Крім того, стрес від тепла зменшує енергію рослин для розвитку квітів і плодів, що призводить до їх меншої кількості та розміру. Гаряча вода також може пошкодити коріння, роблячи рослини вразливими до гнилі коренів. Крім того, навіть при наявності поживних речовин, рослини можуть мати труднощі з їх засвоєнням, що спричиняє дефіцит і пригнічення росту.

Корисні бактерії, хоча й не зазнають такої ж швидкої шкоди від високих температур, також відчують їхній вплив. Їхня ідеальна температура співпадає з оптимальними умовами для рослин і риб. Якщо температура води занадто висока, активність бактерій сповільнюється, що призводить до менш ефективного перетворення відходів риб на поживні речовини для рослин. Це може викликати дисбаланс в системі.

Як і високі температури, низькі температури також можуть порушити баланс в системі аквапоніки. У риб низька температура води знижує апетит, що призводить до меншого споживання їжі та може негативно вплинути на їхній ріст. Крім того, холодна вода робить водні організми менш активними, що послаблює їх і збільшує ризик захворювань та інших проблем зі здоров'ям. У рослин, якщо вода стає занадто холодною, уповільнюються метаболічні процеси, що призводить до гальмування їх росту та розвитку. Також холодна вода ускладнює засвоєння поживних речовин, навіть якщо вони присутні в воді, що може спричинити дефіцит і погіршення здоров'я рослин. При зниженні температури значно сповільнюється активність бактерій. Це зменшує ефективність перетворення аміаку з рибних відходів на нітрати, які використовують рослини. В результаті може виникнути накопичення аміаку у воді, що є токсичним для риб і рослин.

Місце, де розміщується система аквапоніки, має велике значення для контролю температури. Якщо є можливість, можна використовувати теплицю, яка забезпечить контрольоване середовище і дозволить регулювати температуру за допомогою систем опалення та охолодження. Якщо теплиця недоступна, розміщення системи в природно затіненому місці допоможе уникнути перегріву води вдень.

Правильна ізоляція ємностей чи пристосувань із субстратами для рослин допомагає підтримувати стабільну температуру води. Для цього можна використовувати матеріали, такі як пінопластові панелі або відбивні плівки для ізоляції резервуарів. Якщо є можливість, часткове закопування ємності під землю, що дозволяє скористатися природними теплоізоляційними властивостями землі. Важливо також правильно ізолювати закопану частину, щоб уникнути пошкодження водою.

Хороша циркуляція води та аерація не лише сприяють підвищенню рівня кисню; а також відіграють роль у контролі температури.

- Циркуляція є ключовою: рухома вода допомагає рівномірно розподіляти тепло по системі, запобігаючи утворенню кишень гарячої або холодної води. Для досягнення хорошої циркуляції можна використовувати насоси та функції потоку води.
- Перевага аерації: аерація вводить кисень у воду, але також допомагає регулювати температуру. Рух повітря поверхнею води може сприяти розсіюванню тепла, особливо в теплі періоди.

Загалом, температура води відіграє вирішальну роль в успішній системі аквапоніки, оскільки вона впливає на здоров'я та продуктивність усіх живих компонентів: риб, рослин і корисних бактерій. Підтримуючи стабільну температуру в ідеальному діапазоні, можна створити збалансовану екосистему, де всі елементи процвітають. Швидкі коливання температури можуть навантажити вашу систему, тому слід використовувати певні стратегії, щоб підтримувати стабільне середовище. Від розгляду розташування та використання ізоляції до вибору відповідних клімату риб і рослин [2].

1.2.3. Моніторинг якості води. Відомо, що підтримання високої якості води в різних системах аквакультури має першочергове значення, зокрема для здоров'я, і втому числі – продуктивності системи аквапоніки. Правильне управління елементами та складовими аквапоніки забезпечує збалансовану екосистему, де риби та рослини повноцінно розвиваються. Важливо чітко розуміти всю важливість якості води, знати способи її контролю та підтримання, а також необхідні регулярні завдання з обслуговування.

1. Рівень рН. Даний показник впливає на доступність поживних речовин для рослин, активність бактерій, а також на здоров'я риб, запобігаючи стресу. Більшість систем аквапоніки найкраще функціонують в діапазоні рН від 6,8 до 7,2 (від нейтрального до слабокислого). Стабільний рН у цьому діапазоні може гарантувати, що більшість поживних речовин залишаться розчинними та доступними для рослин, забезпечуючи комфортне середовище для риб та

корисних бактерій. Наприклад, якщо рН занадто високий – бажано додати невелику кількість фосфорної кислоти або оцту. Якщо ж рН занадто низький, слід використати гідроксид калію або карбонат кальцію. Для вимірювання рівня рН використовують набори для тестування води або цифрові вимірювачі.

2. Аміак. Риби, що вирощуються у ємності, виробляють аміак як відходи, які є токсичними для них у високих концентраціях, а також може порушитись цикл азоту. Корисні бактерії в біофільтрі перетворюють аміак на нітрити, а потім – на нітрати, які рослини використовують як поживні речовини. Підтримання низького рівня аміаку (бажано нижче 1 ppm, близько 0 ppm (часток на мільйон)) має вирішальне значення для здоров'я риб. Для перевірки використовуються набори для тестування води, а для коригування – зменшується кількість кормів та проводиться перевірка належної роботи біофільтру.

3. Нітрити і нітрати. Нітрати (NO_3) є кінцевим продуктом циклу азоту і є менш токсичними для риб, ніж аміак і нітрити. Водночас, вони є основними поживними речовинами для рослин. Незважаючи на те, що риба може сприймати високі рівні нітратів, підтримання їх на рівні нижче 80 ppm запобігатиме будь-якому потенційному стресу. Високі рівні нітритів (NO_2) токсичні для риб, а ідеальний їх рівень у воді для риб становить 0 ppm. Для моніторингу їх вмісту у воді використовують різні тести або є прилади, а для коригування і зберігання балансу виконується часткова заміна води.

4. Розчинений кисень: достатня кількість розчиненого у воді кисню необхідна для життєдіяльності риб і здоров'я корисних бактерій, активність яких напряму залежить від даного показника. Так. Для оптимальної роботи усієї системи рівень кисню повинен бути вище 5,0 мг/л. Пристрої для аерації, такі як повітряні помпи, насоси, аератори та ін. допомагають підтримувати достатній рівень кисню у воді.

Системи рециркуляції повинні підтримувати також адекватний рівень DO, щонайменше 6,0 мг/л. В установках використовуються системи дифузної аерації для аерації (розчинення кисню з атмосфери у воді), які забезпечують низький

тиск повітря. Системи оксигенації (перенесення чистого кисню у воду) можуть забезпечити концентрацію кисню від 50,0% до 90,0% вище ніж 100,0 мг/л.

Підтримання високого рівня розчиненого кисню у воді надзвичайно важливо для інтенсивного дихання коренів і оптимального росту рослин. Якщо вміст розчиненого кисню низький, поглинання води зменшується, поглинання поживних речовин знижується, що призводить до втрати кореневих клітин і тканин. Це спричиняє зниження росту рослин. Низькі рівні DO також відповідають високим концентраціям CO₂, що, у свою чергу, сприяє росту патогенів у коренях рослин.

Ідеальним рішенням для систем аквапоніки є щільно закриті теплиці, оскільки CO₂ постійно виділяється з води. Повітря, збагачене CO₂, може стимулювати значне підвищення врожайності за таких умов. Підвищення його концентрації вдвічі збільшить фотосинтез рослин, тим самим посиливши асиміляцію азоту, тому ріст підвищить урожайність в середньому на 30,0%. З іншого боку, підвищений CO₂ може порушити розвиток риб, тому дизайн RAS спрямований на мінімізацію його рівнів. Оптимальна концентрація даної речовини має становити нижче 25,0 мг/л [18].

Оптимальна швидкість гідравлічного навантаження (HLR), тобто швидкість потоку води, є також важливим компонентом в аквапонічній системі, оскільки вона впливає на просторові та часові характеристики води і, отже, визначає ріст і врожайність сільськогосподарських культур. Високі показники гідравлічного навантаження (HFR), 3,3 м³/м²/добу, достатні для забезпечення кращих хімічних і фізичних властивостей води аквапоніки для максимального врожаю та якості рослин. HLR має підтримувати значення щонайменше 2,2 м³/м²/день (час гідравлічного утримання від 6,0 до 9,0 год) для вирощування швидкозростаючих культур (китайська капуста і салат), але може бути нижчим для повільно зростаючих культур (базилік і монголь) . Потік води впливає на ефективність системи очищення поживних речовин і підтримання параметрів якості води [15].

Таким чином, загальна інформація про оптимальні параметри середовища аквапонічної системи, способи їх контролю та методи коригування наведені у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1

Основні параметри середовища та методи їх контролю в аквапонічній системі

№	Параметр середовища	Оптимальні значення	Метод контролю / вимірювання	Біологічне значення
1	Температура води	22,0–28,0°C	Цифровий термометр	Впливає на метаболізм риб і ріст рослин
2	pH	6,5–7,5	Тестер pH або лакмусові смужки	Визначає доступність поживних речовин
3	Рівень аміаку (NH ₃ /NH ₄ ⁺)	< 0,5 мг/л	Тест-набір для аміаку	Токсичний для риб при перевищенні
4	Рівень нітритів (NO ₂ ⁻)	< 0,3 мг/л	Тест-набір для нітритів	Впливає на дихальну функцію риб
5	Рівень кисню	> 5,0 мг/л	DO-метр (кисневий зонд)	Необхідний для дихання риб і коренів
6	Інтенсивність освітлення	12,0–16,0 год/добу (200–400 мкмоль/м ² ·с)	Світловий таймер, PAR-сенсор	Стимулює фотосинтез у рослин
7	Вологість субстрату	60–80%	Візуальний контроль / вологомір	Забезпечує стабільність мікробіоти

Висновки з огляду літератури. Таким чином, підсумовуючи огляд літературних джерел, можна зазначити, що аквапоніка є прогресивною технологією вирощування товарної продукції, що поєднує в собі аквакультуру і гідропоніку, створюючи замкнену екосистему. Основна перевага цієї технології полягає в ефективному використанні ресурсів, зокрема води та поживних речовин, що сприяє сталому вирощуванню риб і рослин. Завдяки біологічним

процесам корисні бактерії перетворюють відходи риб на доступні для рослин поживні речовини, забезпечуючи оптимальний баланс у системі.

Конструктивні рішення та технологічні підходи до аквапонічних систем значною мірою визначають їхню ефективність. Освітлення та добовий цикл відіграють ключову роль у функціонуванні аквапоніки, особливо для рослин. Інтенсивність і спектр світла впливають на фотосинтез, а відповідний світловий режим забезпечує оптимальний ріст та розвиток культур. Світлодіодні лампи є ефективним рішенням, оскільки дозволяють регулювати світловий спектр та енерговитрати.

Температура води та навколишнього середовища є критичними факторами для всіх компонентів аквапонічної системи. Високі температури можуть призводити до нестачі кисню у воді, теплового стресу у риб, порушення засвоєння поживних речовин рослинами та зниження активності бактерій. Низькі температури також негативно впливають на систему, уповільнюючи метаболічні процеси у риб і рослин, а також знижуючи ефективність нітрифікації. Для підтримання стабільних температур важливими є правильне розташування системи, ізоляція та використання додаткового обігріву або охолодження.

Моніторинг якості води є необхідною складовою для забезпечення стабільного функціонування аквапонічної системи. Основними параметрами, що підлягають контролю, є рівень аміаку, нітритів, нітратів, рН, температура, вміст розчиненого кисню та електропровідність. Регулярний аналіз дозволяє вчасно виявляти зміни та коригувати умови, запобігаючи стресу та захворюванням риб і рослин.

Саме тому, система аквапоніка є перспективною технологією, яка обов'язково потребує ретельного підходу до проектування, освітлення, регулювання температури та моніторингу якості води. Грамотне управління цими параметрами дозволяє досягти високої продуктивності та екологічної стійкості системи.

РОЗДІЛ II. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Темою бакалаврської кваліфікаційної роботи є «Методи та прийому маніпуляцій середовищами для оптимізації аквапонічної системи».

Дослідження виконувалося з метою виявлення ефективних підходів до управління параметрами середовища в аквапоніці задля підвищення продуктивності системи та біостабільності взаємодії між гідробіонтами й рослинними компонентами

Об'єктами дослідження є елементи аквапонічної системи, як цілісної біотехнічної структури, що поєднує елементи рециркуляційної аквакультури та гідропонічного вирощування рослин.

Предмет дослідження – параметри фізичного, хімічного та біологічного середовищ (водного, субстратного, газового), за яких система досягає екологічної рівноваги, оптимізації умов життєдіяльності гідробіонтів і рослин, підвищення загальної продуктивності системи.

Для реалізації поставленої мети потрібно було виконати наступні завдання:

проаналізувати літературні джерела щодо принципів роботи аквапонічних систем, їх компонентів і сучасних технологій управління середовищами;

- розглянути конструктивні рішення та технологічні підходи до влаштування та використання освітлення, регулювання температури, якості та фільтрації води в аквапоніці;

- вивчити особливості функціонування основних середовищ у системі аквапоніки: тваринного, рослинного та бактеріального;

- проаналізувати вплив світла, субстратів і кормів на стан середовища й ріст рослин у замкненій системі;

- дослідити особливості підтримання балансу у водному середовищі шляхом фільтрації та біологічного очищення.

Представлена робота носить аналітичний характер.

Для реалізації поставлених завдань застосовувались сучасні методи наукових досліджень:

- **аналітичні методи** – опрацювання наукових джерел, дисертаційних робіт, публікацій в галузі аквапоніки, гідробіології, агрономії, зокрема щодо впливу параметрів середовища на життєдіяльність біооб'єктів;

- **порівняльно-аналітичні методи** – використовувалися для оцінки ефективності різних способів маніпуляцій середовищами: температурного контролю, корекції хімічного складу води, регулювання аерації, освітлення рідних спектрів та інше;

- **системний підхід** – для забезпечення комплексного бачення взаємозв'язків між складовими елементами аквапонічної системи та врахування впливу змін середовищ не лише на окремі організми, а й на функціонування системи в цілому.

У процесі реалізації завдань роботи використано багато різних джерел:

- дані з публікацій наукових журналів, монографій та звітів з тематики аквакультури та гідропоніки;

- результати лабораторних спостережень за динамікою параметрів водного середовища в умовах модульної аквапонічної установки;

- експертні висновки з практики впровадження аквапоніки в господарствах;

- діючі нормативні документи щодо якості води та умов утримання гідробіонтів на конкретних сайтах.

Практичне значення отриманих результатів: дослідження дозволяють оптимізувати функціонування аквапонічних систем шляхом ефективного використання методів і прийомів маніпуляції середовищами, що сприяє підвищенню продуктивності вирощування риби та рослин. Це забезпечує економію ресурсів, зниження витрат на виробництво та створює передумови для сталого розвитку аквапонічного господарства.

РОЗДІЛ III. РЕЗУЛЬТАТИ ВЛАСНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1. Середовища, що забезпечують функціонування системи аквапоніки.

Функціонування аквапонічної системи залежить від взаємодії декількох середовищ, які забезпечують її стабільність, продуктивність та екологічну рівновагу. Ці середовища охоплюють, біологічні, мікробіологічні та фізико-хімічні компоненти, що спільно у взаємодії формують замкнутий кругообіг речовин. Кожне з них виконує окрему певну функцію: одні є джерелом поживних речовин, інші виступають регуляторами процесів очищення води, а деякі з них слугують середовищем існування для організмів. Взаємодія цих елементів є критично важливою, оскільки порушення балансу будь-якого з них може призвести до зниження ефективності всієї системи або навіть її збою. Тож розглянемо основні середовища, що забезпечують роботу аквапонічної системи.

Тваринне середовище. Представниками та ключовими елементами даного середовища є риби або інші водні організми (раки, креветки), які виконують роль основного джерела поживних речовин для рослин. Вибір виду риб або інших об'єктів аквакультури та їхня щільність впливають на рівень азотних сполук, які згодом трансформуються в доступні форми для рослин.

Рослинне середовище. Дане середовище представлене культурними рослинами, що виконують функцію природного біофільтра. Саме вони споживають поживні речовини, зокрема нітрати, тим самим очищаючи воду перед її поверненням до риб.

Бактеріальне середовище. Мікроорганізми, зокрема нітрифікуючі бактерії (*Nitrosomonas* та *Nitrobacter*), перетворюють токсичний для риб аміак у нітрати, які слугують добривом для рослин. Це середовище є критично важливим для забезпечення стабільності системи.

Субстратне середовище. У разі використання медіа-бед-системи (грядок із субстратом) додається ще один компонент – носій для кореневої системи

рослин та бактерій. Зазвичай, як субстрат використовують гравій, керамзит або інші інертні матеріали, що забезпечують механічне підтримання рослин та сприяють заселенню корисних мікроорганізмів.

Гідрофізичне середовище – включає воду та її фізико-хімічні параметри, що безпосередньо впливають на життєдіяльність усіх компонентів системи. До ключових факторів належать температура, рН, рівень кисню, солоність та циркуляція води. Стабільність цих показників визначає продуктивність аквапоніки.

Взаємодія цих середовищ забезпечує ефективний кругообіг речовин в аквапонічній системі. Риби продукують відходи, які бактерії переробляють у поживні речовини для рослин. Рослини, у свою чергу, очищують воду, створюючи безпечне середовище для риб. Таким чином, аквапоніка є збалансованою симбіотичною екосистемою, де кожен компонент виконує свою роль у забезпеченні сталого виробництва біологічних ресурсів.

3.1.1. Тваринна складова аквапонічної системи. Одним із найважливіших аспектів аквапоніки, особливо в штучних замкнених системах з теплою водою, є вибір правильного виду риби. Це безпосередньо впливає на загальний стан і продуктивність системи. Системи аквапоніки з теплою водою зазвичай працюють у певному температурному діапазоні, і вибір риби, яка може процвітати в цих умовах, є важливим для процвітання та успіху системи загалом. Такі фактори, як швидкість росту, температурна стійкість і сумісність із ростом рослин, відіграють важливу роль у визначенні придатності риб для тепловодної аквапоніки. Ретельно вибираючи правильні види риб, можливо оптимізувати ефективність і продуктивність системи, забезпечуючи при цьому добробут як риб, так і рослин.

У тепловодних аквапонічних системах підтримання відповідного температурного режиму є ключовим фактором для здоров'я та продуктивності риб і рослин. Оптимальний діапазон температур, хоча і може змінюватися

залежно від конкретних видів, зазвичай знаходиться в межах 24,0–29,0°C. Такі умови сприяють активному метаболізму риб, пришвидшенню їхнього росту та покращенню засвоєнню поживних речовин рослинами. Водночас, важливо уважно контролювати температуру води, оскільки її вихід за межі оптимального діапазону може викликати стрес у гідробіонтів, сповільнити ріст рослин і негативно вплинути на стабільність усієї системи.

Для того, щоб зробити правильний вибір риби для системи, необхідно знати фактори, які слід врахувати, в першу чергу це температура води. Для вирощування в системі аквапоніки краще обирати види, що мають швидкий ріст, що є бажаною характеристикою для таких систем, щоб максимізувати виробничі цикли, та звичайно інтенсивність приросту. Серед таких видів найоптимальнішим вважається тилapia (*Tilapia*) та барамунді (*Lates calcarifer*). Крім того, серед інших популярних видів переважає кларієвий сом (*Clarias gariepinus*), який має більшу адаптивність і оптимальну швидкість набору маси, що також є не менш цінним показником. Важливо звертати увагу щодо вимог поживних речовин, оскільки різні види риб мають різні потреби у кількості поживних речовин. Саме тому, краще вибирати той вид, який продукує відходи, багаті поживними речовинами, що є корисними для росту рослин, та забезпечують збалансований цикл поживними речовинами.

Не менш важливо враховувати стійкість до хвороб. Види риб, з більш стійким організмом до звичайних захворювань і патогенів є звісно кращими через менші ризики для здоров'я та меншої потреби хімічного втручання, сприяючи стійкішому та більш екологічному підходу до аквапоніки. Вибираючи види, які будуть використовуватись, необхідно звернути увагу на вимоги кожного виду до щільності посадки, щоб підібрати кращу ємність, для збереження необхідного простору за рекомендаціями. Риби чи інші об'єкти аквакультури, повинні бути добре сумісні з рослинами, які розміщуватимуться в різних положеннях до рибоводної ємності, залежно від конструктивного рішення

аквапонічної системи, обраний об'єкт не повинен бути агресивним до певних рослин.

Як вже й зазначалось вище, тиляпія є одним з найбільш популярних об'єктів для такої системи, в першу чергу через свою адаптивність, швидкий ріст, можливостей високої щільності посадки та стійкості до широкого діапазону умов середовища, та хвороб (рис. 3.1).



Рис. 3.1. Тиляпія, як найпоширеніший представник системи аквапоніки

Даний об'єкт належить до сімейства *Cichlidae*, походить з Африки, та завезений до різних регіонів світу для розведення в аквакультурі. Тиляпія продукує відходи з високим вмістом поживних речовин, таких як азот, який служить цінним добривом для рослин у системі аквапоніки. Тиляпія надає перевагу температурі води з діапазоном 25,0°C–30,0°C. Вона можуть переносити невеликі коливання, але стабільно низькі температури сповільнюють її ріст. Відносно толерантна до поганої якості води, але підтримання оптимальних умов звичайно ж має вирішальне значення для її здоров'я та росту. Також слід враховувати, що тиляпія може проявляти територіальну поведінку, особливо під час сезону розмноження, що може вимагати ретельного управління, щоб запобігти агресії та перенаселеності в системі аквапоніки.

Ще одним перспективним видом для аквапонічних систем із теплою водою є сом. А саме серед найбільш підходящих видів для вирощування виділяють

каналъного сома (*Ictalurus punctatus*) (рис. 3.2) та його гібрид із блакитним сомом. Ці прісноводні риби мають ніжне на смак м'ясо та користуються попитом у багатьох країнах. Однією з головних переваг саме цього представника є його здатність переносити ширший температурний діапазон порівняно з тілапією – від 18,0 до 32,0°C.



Рис. 3.2. Канальний сом (*Ictalurus punctatus*)

Серед основних переваг вирощування сома варто відзначити його швидкий ріст, що сприяє ефективному веденню аквапонічного господарства. Крім того, сом є витривалим видом, здатним адаптуватися до різних водних умов, що робить його надійним вибором для таких систем. Водночас існують і певні труднощі. Зокрема, сом чутливий до забруднення води, тому важливим аспектом його вирощування є постійний моніторинг та підтримання відповідних параметрів. Також догляд за цією рибою ускладнюється її колючими плавниками та гострими зазубринами, що потребує обережності під час вилову та маніпуляцій.

Серед риб, які успішно вирощують у тепловодних аквапонічних системах, варто виділити великоротого окуня (*Micropterus salmoides*) та малоротого окуня (*Micropterus dolomieu*), що належать до родини *Centrarchidae* та цінуються за високу якість м'яса, що робить їх популярними як серед рибалок, так і в аквакультурі (рис. 3.3).

Великоротий окунь добре пристосовується до теплих вод, комфортно почуваючись у температурному діапазоні 21,0–29,0°C, що відповідає умовам більшості аквапонічних систем. Завдяки швидкому темпу росту, він дозволяє ефективно організовувати виробничі цикли. Окрім того, висока ринкова вартість цієї риби робить її комерційно привабливою, адже великоротий окунь користується значним попитом серед споживачів. Проте вирощується переважно в експериментальному або дослідницькому форматі, а не в промислових масштабах. Основна причина, хіжа природа та схильність до канібалізму, що ускладнює інтенсивне вирощування. Дослідження, проведені в інших країнах (наприклад, Університетом Південного Іллінойсу, США), показують, що для підвищення продуктивності потрібні вдосконалені методи, які в Україні поки що застосовуються обмежено [37].



Рис. 3.3. Великоротий (*Micropterus salmoides*) та малоротий окунь (*Micropterus dolomieu*)

Таким чином, успішне функціонування аквапонічної системи значною мірою залежить від правильного вибору риби. У господарствах такого типу важливо враховувати біологічні особливості кожного виду, його стійкість до змін середовища, темпи росту та сумісність із рослинами. Від невибагливої та продуктивної тиліпії до перспективного окуня – кожен вид має свої переваги й унікальні особливості. Грамотний підхід і розуміння природної взаємодії між водними організмами та рослинами дозволять створити ефективну та стійку систему. Аквапоніка – це не просто метод вирощування, а гармонійний баланс

між природою та технологіями, що відкриває широкі можливості для екологічного та продуктивного господарювання.

3.1.2 Рослинна складова аквапонічної системи. Для створення процвітаючої системи аквапоніки, вирішальне значення має вибір рослин, правильний вибір яких забезпечує оптимальне засвоєння поживних речовин, швидкий ріст і збалансовану екосистему, яка приносить користь усім компонентам.

Оскільки аквапонічна система базується на взаємозв'язку між рибами, рослинами та корисними бактеріями, правильний підбір рослин є ключовим для її ефективного функціонування. Рослини, що добре адаптуються до водного середовища та ефективно засвоюють поживні речовини, сприяють підтриманню балансу всієї екосистеми. Натомість, невідповідний вибір може призвести до дисбалансу поживних речовин, погіршення якості води та зниження врожайності, що негативно вплине як на здоров'я рослин, так і на стан риби.

Успішне функціонування аквапонічної системи залежить від точного налаштування рівня рН та вмісту поживних речовин у воді. Кожен тип рослин має свої вимоги до кислотності середовища, що впливає на здатність рослин засвоювати необхідні поживні елементи. Для більшості аквапонічних рослин оптимальний діапазон рН складає від 6,0 до 7,5. Листова зелень, така як салат чи шпинат, росте найкраще в нейтральних або злегка лужних умовах (рН 6,5–7,2). У свою чергу, плодоносні рослини, наприклад, помідори і перець, потребують більш кисле середовище (рН 5,8–6,5), оскільки для їхнього ефективного росту необхідно більше поживних елементів. Таким чином, встановлення балансу між рН і вмістом поживних речовин у воді важливе для здоров'я рослин і безпеки риб у системі.

Температура води також є важливим фактором не лише для риб, а й для здорового росту рослин в аквапоніці, оскільки різні рослини потребують різних температурних умов. Для рослин, які віддають перевагу більш прохолодним

умовам, як-от салат, капуста чи петрушка, оптимальна температура складає 15,0–22,0°C. З іншого боку, рослини тепловодного середовища, такі як базилік, огірки і помідори, найкраще ростуть при температурі води від 21,0–27,0°C, тобто трішки вищій. Тому необхідно вибирати рослини, які відповідають температурному режиму риб, що також дозволить підтримувати загальний баланс системи.

Швидкість росту рослин є ключовим фактором для ефективного функціонування аквапонічної системи. Рослини, що швидко ростуть, як-от салат, рукола та зелень, забезпечують швидкий урожай, тим самим підтримуючи баланс поживних речовин у воді та сприяючи стабільному функціонуванню системи. У той час, повільно ростучі рослини, такі як полуниця, перець і баклажани, потребують більш тривалого часу для дозрівання та значної кількості поживних елементів. Поєднання різних темпів росту рослин дозволяє створити збалансовану екосистему, де швидкорослі культури підтримують постійний обіг поживних речовин, а більш повільно ростучі рослини додають стабільності та довгострокового врожаю.

Крім того, рослини потребують достатнього освітлення для фотосинтезу і здорового розвитку. Зокрема, для зелених рослин необхідно забезпечити 12,0–16,0 год світла на день. Однак для плодоносних культур, таких як помідори, потрібно більше світла, часто в умовах повного сонця або за допомогою потужного освітлення. Якщо аквапонічна система працює в приміщенні, важливо використовувати спеціальні світлодіодні лампи, які мають спектр, відповідний потребам рослин. Це забезпечить оптимальні умови для росту рослин, навіть в умовах обмеженого природного освітлення.

Тип обраної системи аквапоніки також визначає, які рослини найкраще в ній вирощувати. Для плаваючих систем, таких як *система DWC* (глибоководний культиватор), найкраще підходять рослини з плаваючими коріннями, як салат чи шпинат, оскільки їхні корені можуть безперешкодно занурюватися в кисневу воду. Для *медіа-систем*, що використовують гранульовані матеріали для

підтримання коренів, підходять такі рослини, як помідори чи огірки, які потребують міцної підтримки для своїх коренів. Техніка *поживної плівки* (NFT) добре підходить для невеликих рослин, таких як м'ята, петрушка та полуниця, оскільки вони мають дрібні корені, які потребують лише неглибокого потоку води (рис. 3.4) [31].

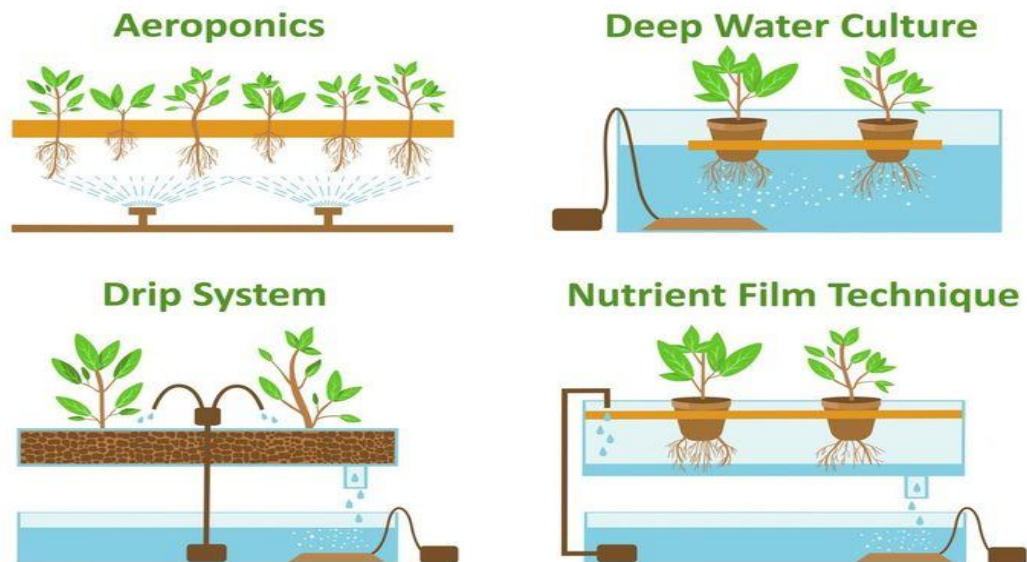


Рис. 3.4. Типи аквапонічних систем

Цілком зрозуміло, що для ефективної роботи аквапонічної системи важливо правильно вибирати рослини, які найбільш підходять для її умов. Вибір рослин залежить від типу системи, рівня поживних речовин у воді, температури та інших факторів (рис. 3.5). Деякі рослини не потребують складного догляду, в той час як інші вимагають стабільних умов та значних затрат поживних елементів. Зазначені нижче рослини є найбільш підходящими для аквапоніки, оскільки вони добре ростуть в таких умовах.

1. *Листова зелень для аквапоніки:* До цієї групи рослин відносяться салат (ромейн, баттерхед, айсберг), шпинат, капуста та рукола. Ці культури відрізняються швидким ростом і не потребують великої кількості поживних речовин. Вони добре почуваються у воді з помірним рівнем поживних речовин, що робить їх ідеальними для нових систем аквапоніки з розвиненим циклом рибних відходів. Листова зелень має короткий цикл росту (3–5 тижнів), що

дозволяє забезпечувати постійний урожай. Також вона здатна адаптуватися до різних рівнів рН (6,0–7,5), що дозволяє використовувати її в системах з різними видами риб. Найкраще ці рослини вирощувати в системах плаваючих плотів або технології поживної плівки (NFT), оскільки їх коренева система є неглибокою.

2. *Трави для аквапоніки* (відмінно підходять для невеликих або внутрішніх систем). Базилік, м'ята, кінза та петрушка – це рослини, які відмінно адаптуються до аквапонічних умов. Трави зазвичай потребують невеликої кількості поживних речовин, що робить їх ідеальними для гідропонних установок, таких як аквапоніка. Вони не мають великої кореневої системи і можуть вирощуватися в неглибоких середовищах, що дозволяє застосовувати техніку NFT. Крім того, трави є дуже потрібними в комерційному секторі завдяки високій цінності в ресторанах та продуктових магазинах.

3. *Плодові рослини для аквапоніки* (вимагають високої кількості поживних речовин). Помідори, перець (болгарський, чилі), полуниця та огірки – рослини, що потребують великої кількості поживних речовин для правильного росту та врожаю. Для них необхідна стабільна і зріла система аквапоніки, яка забезпечує достатньо рибних відходів. Плодові рослини потребують опорних конструкцій для підтримання (наприклад, решіток чи колів для томатів і огірків), оскільки їх гілки та плоди можуть бути досить важкими. Для цих рослин важлива стабільна температура води 2,0–27,0°C, що робить їх ідеальними для співіснування з тепловодними рибами, такими як тилапія чи сом. Плодові рослини мають високу комерційну цінність і можуть приносити великий урожай, як для особистого використання, так і для продажу.

4. *Коренеплоди* (найкраще для медіасистем). Морква, редис та буряк є прикладами коренеплодів, які можуть успішно вирощуватися в аквапонічних системах. Однак для їх вирощування необхідні глибокі грядки середовища, оскільки кореням потрібно більше простору для розвитку. Зазвичай, для таких рослин потрібно не менше 12–18 дюймів середовища. Якщо середовище в системі має поганий дренаж, це може призвести до гниття коренів. Тому

коренеплоди найкраще вирощувати в глибоких гравійних або керамзитових грядках, які забезпечують належну підтримку кореневої системи і одночасно допомагають контролювати рівень води в системі. У разі вирощування коренеплодів важливо забезпечити додаткову гнучкість системи, наприклад, використовуючи гібридні підходи з окремими секціями для цих культур.









Fish Type	Compatible Plants
 Tilapia	 Lettuce, basil, spinach, Swiss chard, kale
 Goldfish	 Herbs (basil, mint) lettuce, strawberries
 Koi	 Leafy greens, bok choy ornamental flowers
 Catfish	 Tomatoes, cucumbers okra

Рис. 3.5. Сумісність видів риб з рослинами

Під час налаштування аквапонічної системи важливо підбирати для риб рослини, які мають схожі потреби в навколишньому середовищі. Для забезпечення успішної та збалансованої системи слід робити правильне поєднання для сумісності, таких як температура, потребу в поживних речовинах, якість води та розмір системи. Риби та рослини повинні процвітати в одному температурному діапазоні, наприклад, тилапія добре росте в теплій воді (25,0–29,0°C), що підходить для помідорів та базиліка. Більшим рибам, таким як сом, потрібно більше місця та вони вироблятимуть більше відходів, що, своєю чергою, сприятиме розвитку рослинництва у великих масштабах. Тому

враховуються масштаби системи, вибираючи рибу та рослини. Для кращого розуміння сумісності риб і рослин в аквапонічних системах можна звернути увагу на рисунок 3.5, який ілюструє оптимальні комбінації найбільш популярних в цій сфері видів риб, із відповідними рослинами, включаючи салат, томати, полуницю та декоративні квіти.

3.1.3. Бактеріальне середовище в аквапонічній системі. Поряд з рослинами і рибами в аквапоніці присутні мікроорганізми. Бактерії є ключовими гравцями у процесах, які є центральними для функціонування та рівноваги аквапонічної системи. Найкраще вивченим процесом є нітрифікація, під час якої аміак (основна форма азоту, що виділяється рибою) перетворюється через нітрит на нітрат, який менш токсичний для риб і кращий для рослин. Основними бактеріями, які беруть участь у цьому перетворенні, є бактерії, що окислюють аміак (AOB), такі як *Nitrosococcus*, *Nitrosospira* та *Nitrosomonas*, і бактерії, що окислюють нітрити (NOB), такі як *Nitrobacter*, *Nitrospira*, *Nitrosococcus* та *Nitrospina*. Деякі популяції *Nitrospira* також здатні здійснювати повне перетворення аміаку в нітрат – і відомі як повні окислювачі аміаку (COMAMMOX) – самі. Групи, такі як *Thaumarchaeota*, також можуть брати участь у процесі окислення аміаку. Група анаеробного окислення амонію (ANAMMOX), члени *Planctomycetes*, відповідальні за анаеробне перетворення амонію та нітриту в закис азоту та N_2 , також можуть відігравати важливу роль там, де рівні кисню низькі [19].

Крім нітрифікації, мікроорганізми беруть участь в інших важливих процесах. Вони можуть сприяти вилученню різноманітних макро- та мікроелементів із залишків корму та твердих фекалій і робити їх доступними для поглинання рослинами. Залежно від напряму аквакультури, конструкції, виду риби та типу корму, близько 15,0–60,0% споживаного корму фактично перетворюється на біомасу риби та використовується ними для метаболізму. Решта виділяється і стає доступною для розкладання бактеріями. Крім цього,

бактерії також можуть відігравати певну роль у розчиненні поживних речовин, що містяться в твердих сполуках, таких як фітати. Крім того, мікроорганізми в аквапоніці також беруть участь у різних шляхах стимулювання росту рослин і захисту, таких як біоконтроль або посилення росту коренів. Однак ці шляхи ще недостатньо з'ясовані. У таблиці 3.1.1 наведено порівняння систем аквакультури (AQ) і аквапоніки (AP), які відрізняються за видами рослин і риб та/або типом корму.

Таблиця 3.1.1

Загальна толерантність якості води для риб, рослин і нітрифікуючих бактерій в аквапонічній системі

Тип організму	Температура (°C)	pH	Аміак (мг/л ⁻¹)	Нітрит (мг/л ⁻¹)	Нітрати (мг/л ⁻¹)	Розчинений кисень (мг/л ⁻¹)
Тепловодна риба	22,0–32,0	6,0–8,5	>3,0	>1,0	>400,0	4,0–6,0
Рослини	16,0–30,0	5,5–7,5	>30,0	>1,0	–	<3,0
Бактерії	14,0–34,0	6,0–8,5	>3,0	>1,0	–	4,0–8,0

Конструкції AP включають як «зв'язані» або замкнуті системи AP (один цикл містить рибу та рослини), так і «роз'єднані» або відкриті системи AP (два окремі цикли для риб і рослин) [19].

3.2. Світло як складова аквапоніки та спосіб регулювання росту рослин.

Освітлення є одним із ключових чинників, що забезпечує ефективний ріст і високу якість рослин у аквапонічних системах. Для повноцінного розвитку рослини потребують світла певної інтенсивності, спектрального складу та тривалості. Освітлення забезпечує енергію, необхідну для фотосинтетичних процесів, від яких залежить ріст, формування біомаси та врожайність рослин. Оскільки в аквапоніці часто використовуються штучні джерела світла,

правильна організація світлового режиму є критично важливою для досягнення високої продуктивності системи.

У аквапонічних установках освітлення зазвичай забезпечується за допомогою штучних джерел, серед яких використовують світлодіодні, люмінесцентні, індукційні лампи та лампи НІД, кожен тип яких має свої особливості, переваги й обмеження.

За відсутності достатнього природного освітлення в закритих установках виникає необхідність використання штучних джерел світла. Правильно підібране освітлення забезпечує рослинам оптимальні умови для фотосинтезу, що сприяє їхньому здоровому росту, розвитку та підвищенню врожайності.

У сучасних аквапонічних установках застосовуються різні типи ламп. Одним із найпопулярніших варіантів є світлодіодні (LED) лампи. Вони відрізняються високою енергоефективністю, тривалим строком служби та можливістю створювати повний спектр світла, який відповідає потребам рослин на різних етапах розвитку. Світлодіоди практично не нагріваються, що дозволяє розміщувати їх ближче до рослин без ризику пошкодження.

Ще одним поширеним рішенням є люмінесцентні лампи, особливо типу T5. Вони забезпечують м'яке світло з помірною інтенсивністю, підходячи для вирощування зелені та рослин із невисокими світловими потребами. Завдяки невеликому виділенню тепла люмінесцентні лампи можна встановлювати на відносно невеликій відстані від рослин, що особливо зручно в невеликих системах [9].

Для великих аквапонічних комплексів нерідко використовують лампи високої інтенсивності (НІД), зокрема металогалогенні (МН) або натрієві лампи високого тиску (HPS). Вони забезпечують потужний світловий потік, сприяючи активному росту та плодоношенню, проте потребують ефективної системи охолодження через значне тепловиділення.

Вибір джерела світла залежить від кількох факторів: виду рослин, розмірів установки, вимог до інтенсивності світла та енергоефективності. Для культур з

високими світловими потребами, таких як томати чи перець, потрібне потужне освітлення, тоді як для зелені та салатів достатньо більш м'якого світлового режиму. Також важливо враховувати вплив тепла від ламп на температуру води в системі, адже перегрів може негативно позначитися як на стані риб, так і на рослинах.

Фотоперіод, тобто тривалість освітлення протягом доби, має суттєвий вплив на ріст рослин. Для переважної більшості видів, що вирощуються в аквапоніці, рекомендується встановлювати світловий день тривалістю від 12,0 до 18,0 год. Листові культури, такі як салат чи шпинат, оптимально ростуть при освітленні 12,0–16,0 год на добу. У свою чергу, плодоносні рослини (наприклад, томати або перець) потребують довшого світлового дня – близько 14,0–18,0 годин. При цьому рослинам обов'язково слід забезпечити і фазу темряви для нормального перебігу метаболічних процесів, оскільки надмірно довгий фотоперіод може призвести до стресу і пригнічення їх розвитку.

В аквапонічних системах використовують різні режими подачі світла. Найпростішим є безперервне освітлення протягом усього фотоперіоду. Однак можливим є також розділення світлового дня на кілька інтервалів, що може стимулювати додаткове накопичення вуглекислого газу в повітрі та покращувати процеси фотосинтезу. Вибір режиму залежить від виду рослин, особливостей системи та поставлених виробничих завдань.

Важливим аспектом є також спектральний склад світла. На вегетативній стадії розвитку рослини потребують переважно синього спектра (400–500 нм), що стимулює активний ріст листя. Під час цвітіння та плодоношення зростає потреба в червоному світлі (600–700 нм), яке сприяє формуванню бутонів і плодів. Сучасні світлодіодні лампи дозволяють налаштувати спектральний склад відповідно до стадії розвитку рослин [13].

Не менш важливим є розташування джерел світла над рослинами. При використанні світлодіодних ламп потужністю 1,0–3,0 Вт рекомендується встановлювати їх на висоті близько 15 см від верхівок рослин. Більш потужні

лампи (5,0 Вт і більше) розміщують на відстані 20,0–30,0 см. Невідповідна відстань може призвести або до недостатнього освітлення, або до перегріву рослин, що негативно впливає на їхній стан.

Для підтримання стабільного світлового режиму в аквапонічних установках широко застосовують автоматизовані системи керування освітленням із використанням таймерів. Це дозволяє точно витримувати задані фотоперіоди та мінімізувати ризики, пов'язані з людським фактором. Загалом грамотне управління освітленням дозволяє оптимізувати процеси росту рослин, підвищити ефективність використання енергії в системі та забезпечити стабільну продуктивність аквапонічної установки.

Таблиця 3.2.1

Рекомендовані параметри освітлення для різних типів рослин в аквапонічних системах

Тип рослин	Тривалість освітлення (год/добу)	Основний спектр світла	Відстань лампи до рослин
Листова зелень	12,0–16,0	Синій (400–500 нм)	15,0 см
Плодоносні рослини	14,0–18,0	Червоний (600–700 нм)	20,0–30,0 см
Культурні трави	12,0–14,0	Синій + червоний	15,0–20,0 см

У сучасних аквапонічних системах важливо не лише забезпечити рослини необхідним світлом для фотосинтезу, але й оптимізувати енергоспоживання системи. Згідно з дослідженнями, використання світлодіодних (LED) ламп з налаштуванням спектру світла відповідно до потреб конкретних видів рослин та їхніх стадій росту може зменшити енергоспоживання до 75,0% порівняно з традиційними джерелами світла .

Адаптація спектру світла дозволяє забезпечити рослини оптимальними умовами для росту на різних етапах розвитку. Наприклад, блакитне світло сприяє вегетативному росту, тоді як червоне – стимулює цвітіння та плодоношення.

Таким чином, можливість регулювання спектру світла в LED-лампах дозволяє підвищити ефективність фотосинтезу та зменшити витрати енергії.

Крім того, LED-лампи мають тривалий термін служби та низьке тепловиділення, що зменшує потребу в додатковому охолодженні системи. Це особливо важливо в умовах закритих приміщень, де перегрів може негативно впливати на ріст рослин та здоров'я риб.

Інтенсивність світла є критично важливим фактором, що впливає на максимальну фотосинтетичну активність рослин. Проте, потреби в освітленні варіюються залежно від виду. Зокрема, овочеві та квітучі культури зазвичай потребують від 12,0 до 16,0 год світлового дня, тоді як темрява протягом не менше 8,0 год також є необхідною для оптимального росту. Визначення оптимального співвідношення світла і темряви найкраще здійснювати шляхом спостереження за реакцією рослин та аналізу особливостей їхнього розвитку. Крім того, різні стадії росту рослин вимагають різних умов освітлення для забезпечення регулярного ритму розвитку, що позитивно впливає на їхнє загальне здоров'я та продуктивність.

Стадія проростання. На початковому етапі проростання насіння потребує м'якого освітлення, бажано в синьому спектрі, для стимулювання росту та формування міцної розсади. Тривалість освітлення на цій стадії зазвичай становить 14,0–16,0 год на добу.

Стадія вегетативного росту. У фазі активного росту листя та стебел, рослини потребують середньої та високої інтенсивності світла з акцентом на синій та червоний спектри. Синє світло сприяє розвитку міцних стебел і листя, тоді як червоне світло стимулює розширення листової пластинки та інтенсифікує процес фотосинтезу. Рекомендована тривалість освітлення на цьому етапі становить 16,0–18,0 год на добу.

Стадія цвітіння. Під час фази цвітіння, рослини отримують найбільшу користь від підвищеного рівня червоного світла. Червоне світло стимулює формування квіткових бруньок та плодів, що є критично важливим для

успішного розмноження та отримання високих врожаїв. На етапі цвітіння рекомендується забезпечити освітлення протягом 12 год на добу [9].

Окрім тривалості та спектру освітлення, важливим фактором є площа, яку ефективно охоплює джерело світла. Ця площа визначається потужністю лампи та її віддаленістю від рослин [13].

3.3. Субстрати в аквапонічних системах для росту рослин.

На відміну від традиційного землеробства, де рослини отримують поживні речовини з ґрунту, в аквапоніці субстрат є інертним матеріалом, який слугує опорою для рослин, дозволяючи їм отримувати необхідні елементи з багатой на поживні речовини води. Таким чином, вибір правильного субстрату має важливе значення для успішного вирощування рослин і загальної продуктивності аквапонічної системи.

В аквапонічних системах використовується широкий спектр субстратів, кожен з яких має унікальні властивості, що впливають на ріст рослин. До поширених типів субстратів належать керамзит, гравій, кокосове волокно, мінеральна вата, перліт і вермикуліт (рис. 3.6).



Рис. 3.6. Приклади субстратів: керамзит, кокосове волокно, мінеральна вата

Керамзит, наприклад, є популярним вибором завдяки своїй легкості, відмінному дренажу та здатності забезпечувати достатню аерацію коренів. Цей матеріал, виготовлений з випаленої глини, має пористу структуру, що сприяє утриманню вологи та забезпечує доступ кисню до коренів, що є критично важливим для здорового росту рослин. Крім того, керамзит має нейтральний рН,

що робить його придатним для широкого спектру рослин і не впливає на хімічний баланс аквапонічної системи. Завдяки своїй формі та розміру, керамзит забезпечує стабільну підтримку для рослин, запобігаючи їх перекиданню та сприяючи рівномірному розподілу коренів [8].

Гравій є економічно вигідним варіантом, але він важчий і може потребує ретельного промивання перед використанням. Є такі, що складаються з дрібних каменів, що може забезпечити хорошу підтримку для великих рослин, але його здатність утримувати вологу є відносно низькою. Тому перевагою є гравій з гладкою поверхнею, щоб уникнути пошкодження коренів рослин, і такий, що ретельно промивається для видалення пилу та бруду з його поверхні, які можуть забити аквапонічну систему. Крім того, гравій може впливати на рН води, тому необхідно контролювати цей параметр і вживати відповідних заходів для його регулювання [10].

Кокосове волокно є відновлювальним ресурсом, який добре утримує вологу і забезпечує хорошу аерацію, що робить його придатним для різних видів рослин. Даний субстрат отриманий з волокон кокосового горіха, має високу пористість і здатність утримувати воду, забезпечуючи оптимальне середовище для росту коренів. Воно також має природні антимікробні властивості, які можуть допомогти запобігти розвитку гнилі коренів та інших захворювань рослин. Кокосове волокно може використовуватися як самостійний субстрат або в поєднанні з іншими матеріалами для покращення їхніх властивостей.

Мінеральна вата, хоча зазвичай використовується в гідропоніці, також може застосовуватися в аквапоніці завдяки її здатності утримувати вологу. Мінеральна вата, виготовлена з розплавлених гірських порід, має волокнисту структуру, яка забезпечує відмінне утримання вологи та аерацію. Однак вона має високий рН, тому перед використанням її необхідно обробити для зниження лужності. Крім того, мінеральна вата не розкладається біологічно, що може викликати труднощі з її утилізацією.

Перліт і вермикуліт часто використовуються в поєднанні з іншими субстратами для покращення дренажу та утримання вологи відповідно. Перліт – вулканічне скло, що зазнало термічної обробки, має низьку щільність і високу пористість, що робить його ефективним для покращення дренажу та аерації ґрунтових сумішей. Вермикуліт – мінерал, що розширюється при нагріванні, має високу здатність утримувати воду та поживні речовини, що робить його корисним для утримання вологи та живлення рослин [7].

Субстрат взагалі має певний вплив і на ріст, і розвиток рослин в аквапоніці. Кожен з перелічених субстратів має різну здатність утримувати воду та поживні речовини, забезпечувати аерацію кореневої зони та забезпечувати фізичне підтримання рослин. Ці фактори можуть впливати на ріст коренів, поглинання поживних речовин і їх загальний розвиток. Наприклад, субстрати з високою водоутримуючою здатністю, такі як кокосове волокно, можуть бути корисними для рослин, які потребують постійного постачання вологи, тоді як субстрати з відмінним дренажем, такі як керамзит, можуть запобігти перезволоженню та сприяти здоровому росту коренів у видів, чутливих до надлишку води.

Таблиця 3.3.1

Основні характеристики субстратів для вирощування рослин в аквапонічних системах

Субстрат	Основні переваги	Основні недоліки	Примітки щодо використання
Кокосові волокна	Гарна аерація та збереження вологи, екологічність	Може потребувати попередньої промивки через вміст солей	Підходить для більшості рослин
Гравій	Висока стійкість, добрий дренаж	Важкий, потребує хорошої опори конструкції	Часто використовується для більших систем
Мінеральна вата	Відмінне утримання вологи та повітря	Може подразнювати шкіру, потребує обережного поводження	Ідеальна для розсади та молодих рослин
Перліт	Легкість, гарна аерація	Швидко пересихає без належного поливу	Часто змішують з іншими субстратами
Вермикуліт	Висока вологоємність, стабільність структури	Менша аерація порівняно з перлітом	Добре підходить для збереження вологи

У таблиці 3.3.1 наведено основні характеристики субстратів, які використовуються для вирощування рослин в аквапонічних системах, зокрема їх переваги, недоліки та приклади застосування. Аналіз цих даних дозволяє зробити висновок, що оптимальний вибір субстрату залежить від типу рослин, умов вирощування та доступності матеріалів. Наприклад, для рослин із високою стійкістю до вологи, таких як салат, ідеально підходить мінеральна вата, тоді як для рослин із тривалим періодом вегетації, таких як томати, частіше використовують перліт через його легкість і гарну аерацію. Таким чином, правильний підбір субстрату сприяє підвищенню ефективності аквапонічної системи та забезпечує стабільний урожай. Крім того, текстура і структура субстрату можуть впливати на легкість, з якою коріння проникає і розширюється, що, в свою чергу, впливає на поглинання поживних речовин і ріст рослин [8].

3.4. Корми для риби, як аспект впливу на середовище аквапоніки.

Вибір кормів для риби в аквапонічній системі є одним з ключових факторів, що визначають не лише продуктивність вирощування риби, але й екологічну стійкість та ефективність функціонування всієї системи. Цей аспект тісно пов'язаний з попередніми розділами, де розглядалися загальні принципи аквапоніки, гідродинаміка системи та вплив різних параметрів на її ефективність. Зокрема, склад кормів має прямий вплив на якість води, доступність поживних речовин для рослин, утворення відходів та, зрештою, на загальний екологічний баланс аквапонічного симбіозу.

На сучасному ринку представлений широкий асортимент комерційних кормів для аквакультури, що відрізняються за складом, формою (гранули, пластівці), розміром частинок та призначенням (для різних видів риби, їхніх вікових стадій та фізіологічних потреб). Основу цих кормів складають макронутрієнти – білки, жири та вуглеводи, а також мікронутрієнти – вітаміни та мінерали. Однак, джерела цих поживних речовин можуть суттєво

варіюватися, що зумовлює значні відмінності у їхньому впливі на навколишнє середовище [20].

Традиційно, значну частку білка в рибних кормах займає рибне борошно та риб'ячий жир, які отримують з виловленої дикої риби. Виробництво рибного борошна часто пов'язане з проблемою надмірного вилову, що призводить до виснаження природних рибних запасів та порушення морських екосистем. Згідно з дослідженнями, значна частина світового вилову риби використовується не для безпосереднього споживання людиною, а для виробництва кормів у аквакультури. Це створює значний тиск на морські екосистеми та ставить під загрозу їхню біологічну різноманітність [36].

В аквапонічних системах, де вода циркулює між рибним та рослинним компонентами, склад кормів має особливе значення. Надлишок поживних речовин, що виділяються з нез'їдених залишків кормів та екскрементів риб, може призвести до накопичення розчинних сполук, таких як азот та фосфор. Надмірна концентрація цих елементів може спричинити дисбаланс у системі, призвести до евтрофікації водного середовища, стимулювати надмірний ріст водоростей (що, у свою чергу, може призвести до зниження рівня розчиненого кисню) та негативно вплинути на здоров'я як риб, так і рослин. Особливо проблемним є надлишок амонійного азоту, який є токсичним для риб у високих концентраціях. Тому, розробка оптимальних рецептур кормів з метою мінімізації виділення цих елементів є критично важливим завданням для забезпечення стабільного та ефективного функціонування аквапонічної системи.

З огляду на зростаючі екологічні проблеми, пов'язані з виробництвом традиційних рибних кормів, останнім часом все більше уваги приділяється пошуку альтернативних та більш екологічно сталих джерел білка. До таких джерел належать:

Протеїн з комах. Личинки деяких видів комах, наприклад, чорної лєвової мухи (*Hermetia illucens*), та борошняні черви є багатим джерелом високоякісного білка, жирів та інших корисних поживних речовин. Їхнє використання в

аквапоніці є перспективним, оскільки вони можуть ефективно перетворювати органічні відходи в цінний корм для риб.

Виробництво протеїну з комах має значно менший екологічний слід порівняно з виробництвом рибного борошна, оскільки вимагає менше землі та води, а також сприяє переробці органічних відходів [37]. Комахи, такі як личинки чорної лєвової мухи та борошняні черви, мають високий вміст білку, необхідних жирів та інших корисних поживних речовин, що робить їх чудовою альтернативою традиційним кормам (Go Green Aquaponics). Це особливо важливо для аквапонічних систем, де важливо мінімізувати негативний вплив на водне середовище, забезпечуючи при цьому здоровий ріст риби.

Водорості. Деякі види водоростей, такі як спіруліна та хлорела, містять значну кількість білка, а також інші цінні поживні речовини, такі як вітаміни, мінерали та омега-3 жирні кислоти. Вирощування водоростей для виробництва кормів є екологічно чистим процесом, оскільки не потребує великих площ землі та може здійснюватися з використанням стічних вод. Використання водоростей як компонента кормів може не тільки забезпечити рибу необхідними поживними речовинами, але й сприяти зниженню залежності від традиційних джерел білка, таких як рибне борошно. Водорості можуть бути особливо корисними в аквапоніці, оскільки вони також можуть поглинати надлишок поживних речовин з води, сприяючи її очищенню [21].

Рослинні білкові концентрати. Білкові концентрати, отримані з сої, гороху, соняшнику та інших рослин, можуть бути використані як часткова або повна заміна рибного борошна у складі рибних кормів. Однак, при їхньому використанні важливо враховувати амінокислотний склад, щоб забезпечити повноцінне харчування риби. Забезпечення збалансованого амінокислотного профілю є критично важливим для оптимального росту та розвитку риби в аквапонічній системі, де риба є ключовим джерелом поживних речовин для рослин.

Інші альтернативні корми, наприклад, деякі дослідження вивчають можливість використання опалого листа, яке, після компостування, може слугувати кормом для певних видів риби. Це може бути особливо актуально для малих фермерських господарств, де доступні місцеві ресурси. Використання місцевих та відновлюваних ресурсів для виробництва кормів може підвищити екологічну та економічну стійкість аквапонічних систем, зменшуючи їхню залежність від зовнішніх поставок та знижуючи витрати.

Різні види риби мають різні харчові потреби, тому обов'язково потрібно враховувати ці аспекти для кожного представника. Деякі риби є рослиноїдними, інші – хижаками, а треті – всеїдними. Тому, корм повинен бути адаптований до конкретних потреб вирощуваних видів. Наприклад, для рослиноїдних риби важливо забезпечити достатню кількість рослинних компонентів у кормі, тоді як для хижаків – високий вміст білку тваринного походження. В аквапоніці, де вирощуються різні види риби, важливо підбирати корм, який би оптимально відповідав їхнім потребам, забезпечуючи при цьому мінімальний негативний вплив на систему [20].

Таблиця 3.4.1

Вплив кормів для риби на середовище аквапонічної системи

Тип корму	Вплив на якість води	Вплив на біологічну рівновагу	Вплив на рослини	Причини впливу
Комерційні гранульовані корми	Середній (може спричинити накопичення нітратів)	Не завжди збалансований склад для всіх видів риби	Може знижувати ефективність росту рослин через надлишок аміаку та нітратів	Високий вміст фосфатів, білків та домішок
Живі корми (черви, личинки)	Низький (підвищують біорізноманіття)	Покращують біологічну активність у воді	Позитивний вплив на здоров'я рослин	Природний склад, низька токсичність

Рослинні корми (качкина трава, водорості)	Низький (екологічно чисті)	Сприятливі для мікрофлори води	Покращують ріст рослин	Мінімальний вплив на водний баланс
Альтернативні білкові джерела (личинки, чорні солдатські мухи)	Дуже низький (ефективно засвоюються, мінімум відходів)	Позитивно впливають на воду, зменшують забруднення	Підвищують ефективність росту рослин через оптимальні умови для води	Високий рівень засвоюваності та низький вплив на навколишнє середовище

Ефективне управління годівлею також відіграє важливу роль у мінімізації негативного впливу кормів на навколишнє середовище аквапонічної системи. Правильне визначення дозування корму відповідно до біомаси риби, її віку, виду та фізіологічного стану, а також оптимальна частота годівлі, дозволяють зменшити кількість нез'їдених залишків та, відповідно, зменшити навантаження на систему фільтрації. Використання якісних кормів з високою засвоюваністю також сприяє зниженню обсягу екскрементів та підвищенню ефективності використання поживних речовин. Крім того, важливо враховувати швидкість розчинення корму у воді, оскільки занадто швидке розчинення може призвести до втрати поживних речовин та забруднення води. Оптимізація параметрів годівлі є важливою складовою сталого управління аквапонічною системою, забезпечуючи не лише здоров'я риби, але й всієї екосистеми.

Використання та вибір кормів для риби в аквапонічній системі є складним та багатограним завданням, що вимагає комплексного підходу. Слід врахувати склад кормів, їх вплив на якість води та екологічні аспекти їхнього виробництва, а також оптимізувати стратегії годівлі, що дасть та забезпечить сталий та екологічно відповідальний для функціонування аквапонічних господарств. Подальші дослідження в цій галузі, спрямовані на розробку та впровадження інноваційних кормів з низьким екологічним слідом, а також на розробку ефективних стратегій годівлі, матимуть важливе значення для розвитку

аквапоніки як стійкої технології виробництва харчових продуктів та її поширення в малих фермерських господарствах [25].

3.5. Особливості фільтрації води в аквапоніці для забезпечення балансу системи.

На відміну від традиційних методів вирощування риби, де відходи можуть накопичуватися до токсичних рівнів, в аквапоніці фільтрація є невід'ємною функцією, яка одночасно кондиціонує воду для риби та забезпечує поживні речовини для рослин. Ефективна фільтрація в аквапоніці передбачає комплексний підхід, що включає видалення твердих частинок, перетворення токсичних азотистих сполук та підтримання оптимальних параметрів води для обох компонентів системи.

Механічна фільтрація може включати в себе видалення зважених твердих частинок, таких як нез'їдений корм, фекалії риби та детрит, з аквапонічної системи. Ці частинки, якщо їх не видалити, можуть піддаватися розкладанню, призводячи до споживання розчиненого кисню та виділення шкідливих речовин, таких як амонійний азот. Накопичення органічних речовин також може сприяти розвитку анаеробних зон, де відбуваються небажані процеси, такі як утворення сірководню. Існує кілька методів механічної фільтрації, кожен з яких має свої переваги та обмеження.

Осадження є найпростішим методом, що використовує гравітацію для осідання частинок у відстійниках. Фільтри грубого очищення, що використовують матеріали, такі як гравій або сітки, ефективні для затримання великих частинок. Тонкі фільтри, в яких застосовуються дрібніші матеріали, такі як пісок або діатомітова земля, забезпечують видалення дрібніших частинок, покращуючи прозорість води. Барабанні фільтри є вискоефективним рішенням, особливо для великих систем, що використовують обертовий барабан з дрібною

сіткою для безперервного видалення частинок. Ефективна механічна фільтрація не тільки зменшує навантаження на інші компоненти системи фільтрації, такі як біофільтри, але й значно покращує загальну якість води, створюючи більш сприятливі умови для риб та рослин.

Біологічна фільтрація є ключовим процесом в аквапоніці, що забезпечує перетворення токсичних азотних сполук, таких як амоній (NH_4^+), у менш шкідливі нітрати (NO_3^-). Цей процес, відомий як нітрифікація, є двоступеневим окисленням, що здійснюється двома групами аеробних бактерій. Бактерії *Nitrosomonas* перетворюють амоній на нітрит (NO_2^-), який також є токсичним для риб. Потім, бактерії *Nitrobacter* перетворюють нітрит на нітрат (NO_3^-), який є відносно нетоксичним для риб у низьких концентраціях і є основною формою азоту, яку поглинають рослини для росту. Для ефективної біологічної фільтрації необхідна велика площа поверхні для колонізації цих корисних бактерій. Зазвичай використовуються різні матеріали-носії, включаючи біокульки, біофільтри з рухомим шаром (MBBR), фільтри з киплячим шаром та лава камінь. Біокульки, виготовлені з пластику, мають велику площу поверхні, але можуть потребувати регулярного очищення. MBBR та фільтри з киплячим шаром забезпечують високу ефективність та самоочищення завдяки постійному руху носіїв у воді. Лава камінь – природний пористий матеріал, також забезпечує значну площу поверхні для колонізації бактерій. Ефективна біологічна фільтрація є критично важливою для підтримання низьких рівнів амонію та нітритів, забезпечуючи здоров'я риб та оптимальне живлення рослин в аквапонічній системі [15].

Окрім механічної та біологічної фільтрації, для підтримання стабільного балансу аквапонічної системи важливі інші фактори. Аерація, або забезпечення достатнього рівня розчиненого кисню, є критично важливим не тільки для дихання риб, але й для аеробних бактерій, що здійснюють нітрифікацію. Низький рівень кисню може призвести до пригнічення нітрифікації та накопичення токсичних сполук. Контроль рН є ще одним важливим параметром, оскільки

оптимальний рН (зазвичай в межах 6,0–7,0) є важливим для нітрифікуючих бактерій, розчинності поживних речовин та здоров'я як риби, так і рослин. Різні види риби та рослин мають різні оптимальні діапазони рН, тому важливо підтримувати стабільний рН, який є прийнятним для обох компонентів системи. Температура води також впливає на швидкість нітрифікації та метаболізм риби. Оптимальний діапазон температур залежить від видів риби та рослин, що вирощуються в системі. Регулярне видалення осаду, або накопичених твердих частинок, з відстійників та інших частин системи є важливим для запобігання накопиченню органічних речовин, підтримання ефективності фільтрації та запобігання утворенню анаеробних зон.

Ефективна фільтрація в аквапоніці не є окремим процесом, а скоріше невід'ємною та інтегрованою частиною всієї системи. Розмір та тип фільтрів повинні бути адаптовані до розміру рибної частини, типу та щільності посадки рослин, а також загального дизайну системи. Правильно спроектована система забезпечує ефективний потік води, оптимальний розподіл поживних речовин та мінімізує накопичення відходів. Наприклад, система з високою щільністю посадки риби вимагатиме більш потужної та ефективної системи фільтрації, ніж система з низькою щільністю. Подібним чином, вибір рослин також може впливати на вимоги до фільтрації, оскільки різні рослини мають різні потреби у поживних речовинах [26].

Таким чином, фільтрація води відіграє ключову роль у стабільній роботі аквапонічної системи. Вона створює безпечні умови для риби, забезпечує рослини необхідними речовинами та допомагає зберігати екологічну рівновагу в усьому комплексі. Щоб така система працювала довго й ефективно, дуже важливо правильно її спроектувати, обслуговувати й контролювати.

РОЗДІЛ IV. ОХОРОНА ПРАЦІ

Як і в будь-якій виробничій діяльності, охорона праці є надзвичайно важливим аспектом включаючи аквапонічні системи.

Аквапонічні системи, що інтегрують принципи гідропоніки та аквакультури, створюють специфічні ризики для працівників. Для розробки дієвих заходів профілактики необхідно визначити ці потенційні загрози. Робота з водою та рибою в таких системах може спричинити контакт із різними біологічними факторами, зокрема патогенними мікроорганізмами. Наприклад, бактерії, такі як *Aeromonas* або *Streptococcus*, можуть переноситися від риби до людини, викликаючи захворювання. Крім того, працівники можуть стикатися з алергенами, такими як риб'яча луска, складові кормів чи водорості, що здатні провокувати алергічні реакції в окремих осіб.

В аквапоніці застосовуються хімічні речовини, які можуть створювати ризики для здоров'я працівників. Наприклад, дезінфікуючі засоби, такі як хлор або озон, використовуються для очищення води, але при неправильному застосуванні можуть викликати подразнення шкіри, очей або дихальних шляхів. Хоча пестициди та гербіциди в аквапоніці зазвичай використовуються мінімально, їхні залишки у воді чи на рослинах все ще можуть становити небезпеку. Крім того, хімічні добавки для корекції рН або інших параметрів води можуть бути шкідливими, якщо не дотримуватися техніки безпеки.

Дана діяльність також може проявлятися і з фізичними ризиками для працівників. Електрообладнання, наприклад насоси, обігрівачі чи освітлення, створює небезпеку ураження струмом, особливо у вологих умовах. Слизькі підлоги та робота біля водойм підвищують імовірність падінь і травм. Крім того, шум від певного обладнання може перевищувати безпечні рівні, що з часом може спричинити порушення слуху. Перенесення важких предметів, таких як мішки з кормом або обладнання, може призводити до травм спини та інших м'язово-скелетних проблем [32].

Для зниження ризиків в аквапонічних системах необхідно впроваджувати комплексні заходи безпеки. Щоб захистити працівників від біологічних загроз, слід використовувати засоби індивідуального захисту, зокрема рукавички, водонепроникне взуття та фартухи. Регулярне миття рук з милом після контакту з рибою чи водою є важливим для запобігання інфекціям. У деяких випадках працівникам, які постійно працюють із певними видами риб, може бути рекомендована вакцинація проти специфічних хвороб. Також забезпечення здоров'я риб через належні умови утримання та профілактику захворювань допомагає зменшити ризик передачі патогенів людині.

Правильне поводження з хімічними речовинами є критично важливим для запобігання нещасним випадкам. Хімічні речовини слід зберігати та використовувати відповідно до інструкцій виробника, уникаючи їхнього змішування, якщо це не передбачено. Забезпечення належної вентиляції робочих приміщень може допомогти зменшити концентрацію шкідливих хімічних речовин у повітрі. Працівники повинні використовувати відповідні засоби індивідуального захисту, такі як захисні окуляри, хімічно стійкі рукавички, для захисту від впливу хімічних речовин. Навчання працівників правилам безпечного поводження з хімічними речовинами, включаючи процедури у разі розливу або інших аварійних ситуацій, є обов'язковим.

Для захисту від фізичних небезпек необхідно вжити певні заходи. Електричне обладнання повинно бути належним чином заземлене та регулярно перевірятися на наявність пошкоджень. Підлоги повинні бути завжди сухими та чистими, а працівники повинні носити взуття з неслизькою підошвою для запобігання падінням.

Усі працівники, які працюють в аквапонічних системах, повинні пройти обов'язкове навчання та інструктаж з охорони праці. Це навчання повинно охоплювати:

- Загальні правила безпеки при роботі в аквапонічних системах.
- Ідентифікація та оцінка потенційних небезпек.

- Правильне використання засобів індивідуального захисту.
- Процедури безпечного поводження з обладнанням та хімічними речовинами.
- Надання першої допомоги у разі нещасних випадків.
- Дії у разі виникнення аварійних ситуацій, таких як розливи хімічних речовин або ураження електричним струмом.

Регулярні інструктажі та оновлення знань з охорони праці є важливими для забезпечення постійного рівня безпеки на робочому місці.

Дотримання вимог охорони праці в аквапонічних системах є невід'ємною частиною сталого та відповідального виробництва харчових продуктів. Забезпечення безпечних умов праці не тільки захищає здоров'я та добробут працівників, але й сприяє підвищенню продуктивності та зниженню ризиків, пов'язаних з виробничою діяльністю [33].

ВИСНОВКИ

У результаті підготовки дипломної роботи за темою було встановлено, що аквапоніка є перспективною екологічною технологією, яка поєднує вирощування риби та рослин у замкненій системі з циркуляцією води. Завдяки симбіотичному зв'язку між компонентами системи – тваринним, рослинним і бактеріальним – забезпечується стабільний біологічний баланс, мінімізуються втрати ресурсів і знижується вплив на навколишнє середовище.

Проведений аналіз літературних джерел показав, що аквапонічні системи базуються на інтеграції аквакультури та гідропоніки, де ключовими компонентами є рибний резервуар, зона вирощування рослин і система фільтрації. Сучасні технології управління середовищами включають автоматизовані системи контролю температури, рН, рівня кисню та поживних речовин, що підвищують ефективність і стабільність роботи аквапоніки.

Обов'язкові конструктивні рішення та технологічні підходи до влаштування аквапонічних систем. Зокрема, встановлено, що правильне освітлення (LED-лампи з регульованим спектром) сприяє фотосинтезу рослин, а регулювання температури (в межах 24–30°C) забезпечує комфортні умови для риб, таких як тилапія (*Oreochromis niloticus*) чи кларієвий сом (*Clarias gariepinus*). Фільтрація води (механічна, біологічна, хімічна) відіграє вирішальну роль у підтриманні її якості, що є критично важливим для замкнених систем.

Вивчено особливості функціонування основних середовищ аквапонічної системи. Тваринне середовище (риби) забезпечує поживні речовини через відходи, які бактеріальне середовище (нітрифікуючі бактерії, наприклад *Nitrosomonas* і *Nitrobacter*) перетворює на нітрати. Рослинне середовище (наприклад, салат, базилік) поглинає ці нітрати, очищаючи воду. Баланс між цими середовищами є ключовим для сталого функціонування системи.

Проаналізовано вплив світла, субстратів і кормів на стан середовища та ріст рослин. Використання світла з оптимальним спектром (червоне та синє) прискорює ріст рослин, таких як салат, на 15–20%. Субстрати, зокрема перліт і

кокосові волокна, забезпечують кращу аерацію та утримання вологи, що сприяє розвитку кореневої системи. Корми для риб (збалансовані за білками та жирами) впливають на кількість поживних речовин у воді, що потребує корекції для уникнення надлишку нітратів.

Досліджено особливості підтримання балансу у водному середовищі. Механічна фільтрація ефективно видаляє тверді відходи, тоді як біологічне очищення за допомогою бактерій забезпечує перетворення аміаку на нітрати. Регулярний контроль параметрів води (рН 6,5–7,0, рівень аміаку <0,5 мг/л) дозволяє уникнути токсичного впливу на риб і рослини, забезпечуючи стабільність системи.

Отже, застосування методів маніпуляції середовищами, таких як оптимізація освітлення, вибір субстратів, регулювання температури та якості води, дозволяє значно підвищити продуктивність аквапонічних систем. Отримані результати мають практичне значення для сталого розвитку аквапонічного господарства, зокрема в умовах України, де такі системи можуть стати перспективним напрямом для вирощування риби та рослин.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Dhal, B., Rana, A., & Dash, S. Sustainable and profitable aquaponics systems: Innovations and research advances. *Environmental Challenges*, 2024, 13, 100411. DOI: [10.1016/j.envc.2024.100411](https://doi.org/10.1016/j.envc.2024.100411).
2. Go Green Aquaponics. The Effects of Water Temperature in Aquaponics. URL: <https://gogreenaquaponics.com/blogs/news/the-effects-of-water-temperature-in-aquaponics> .
3. Dhal, B., Dash, S., & Rana, A. Innovations and future prospects in aquaponic farming. *Agricultural Systems*, 2024, 218, 104001. DOI: [10.1016/j.agry.2024.104001](https://doi.org/10.1016/j.agry.2024.104001).
4. Польовий В. М., Майборода Х. А. Аквапоніка як інноваційна технологія для вирощування екологічно чистих продуктів Вісник НУВГП. Сільськогосподарські науки: зб. наук. праць, 2022. Вип. 3(99). С. 116-126.
5. FriendlyAquaponics. (n.d.). *Aquaponics Terms Easily Confused: Substrate vs. Growing media*. <https://friendlyaquaponics.com/aquaponics-terms-easily-confused-substrate-vs-growing-media/>
6. Go Green Aquaponics. (n.d.). *The Ultimate Aquaponics Beginner's Guide*. <https://gogreenaquaponics.com/blogs/news/ultimate-aquaponics-beginners-guide>
7. Viemose DGS. (n.d.). *Substrates for Indoor Farming: The Best Options*. <https://viemose-dgs.dk/substrates-indoor-farming/>
8. GREEN FUTURE. (n.d.). *Субстрати*. <https://greenfuture.com.ua/ua/magazin/substrati-dobriva/substrati>
9. Кононенко І.С., Бегаль Ю. С. Світло як важлива складова аквапоніки. // Дні студентської науки у Львівському національному університеті ветеринарної медицини та біотехнологій імені С. З. Гжицького: матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції здобувачів вищої освіти та молодих учених (Львів, 4–5 квітня 2024 р.). Львів: ЛНУВМБ імені С. З.

Гжицького, 2024. С. 127–128. Available at:
https://lvet.edu.ua/images/step/2025/04/08/btf_2024.pdf

10. Aquaponics for Beginners. (n.d.). *The Role of Grow Media in Plant Growth in Aquaponics*. <https://www.aquaponicsforbeginners.com/the-role-of-grow-media-in-plant-growth-in-aquaponics/>

11. Wang, J., Yang, H., & Xu, Q. A novel circular economy model for aquaponics integrating photovoltaic, aquaculture, and hydroponics systems. *Agricultural Systems*, 2024, 222, 103080. DOI: [10.1016/j.agsy.2024.103080](https://doi.org/10.1016/j.agsy.2024.103080).

12. Fresenborg, L., Lennartz, B., & Junge, R. Enhancing plant growth in aquaponic systems via potassium manipulation in fish feeds: A pilot study of tailored feeds bridging nutritional gaps in aquaponics. *ResearchGate*, 2024. DOI: [10.13140/RG.2.2.20082.94401](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.20082.94401).

13. Go Green Aquaponics. The Best Grow Lights for Indoor Aquaponics Systems. 2023. Available at:
<https://gogreenaquaponics.com/blogs/news/the-best-grow-lights-for-indoor-aquaponics-systems>.

14. Nacheva, I., Georgieva, L., & Pehlivanov, L. Integrated aquaponic systems as an environmentally friendly technology for plant production: A case study. *Heliyon*, 2025, 11(5), e20719. DOI: [10.1016/j.heliyon.2025.e20719](https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e20719).

15. Третяк, В.М., Лисенко, С.С., Роїк, М.В. Аквапоніка – шлях до сталого розвитку аграрної сфери. *Водні ресурси та аквакультура*, 2019, № 2, С. 68–74. Available at: <http://wra-journal.ksauniv.ks.ua/archives/2019/2/9.pdf>.

16. Go Green Aquaponics. What is Aquaponics and How Does It Work? 2023. Available at: <https://gogreenaquaponics.com/blogs/news/what-is-aquaponics-and-how-does-it-work>.

17. Yep, B., & Zheng, Y. Aquaponic trends and challenges – A review. *Agriculture*, 2022, 12(5), 646. DOI: [10.3390/agriculture12050646](https://doi.org/10.3390/agriculture12050646).

18. BTL Liners. What Are the Disadvantages of Aquaponics? 2023. Available at: <https://www.btl liners.com/what-are-the-disadvantages-of-aquaponics>.

19. Schmutz, Z., Graber, A., Jaenicke, S., Goesmann, A., Junge, R. Exploring bacterial communities in aquaponic systems. ResearchGate, 2019. DOI: [10.13140/RG.2.2.18470.57929](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.18470.57929).
20. Earth.Org. Aquaponics: A Solution to Food Insecurity. 2023. Available at: https://earth.org/data_visualization/aquaponics-a-solution-to-food-insecurity/.
21. GoGreen Aquaponics. Alternative Fish Food in Aquaponics. 2023. Available at: <https://gogreenaquaponics.com/blogs/news/alternative-fish-food-in-aquaponics>
22. Gasco, L., et al. (2018). Alternative protein sources for sustainable aquafeeds. *Reviews in Aquaculture*, 10(3), 639-661.
23. Go Green Aquaponics. (n.d.). *Alternative Fish Food in Aquaponics*. [<https://gogreenaquaponics.com/blogs/news/alternative-fish-food-in-aquaponics>]
24. Makkar, H. P. S., Tran, G., Heuze, V., Doreau, M. (2014). State-of-the-art on use of insects as animal feed. *Animal Feed Science and Technology*, 197, 1-33.
25. Naylor, R. L., et al. (2009). Aquaculture—a gateway to more sustainable animal protein? *Annual Review of Environment and Resources*, 34, 233-259.
26. Rakocy, J. E., et al. (2006). *Recirculating Aquaculture Tank Production Systems: Aquaponics—Integrating Fish and Plant Culture*. SRAC Publication No. 454.
27. Storebakken, T., Hardy, R. W., & Åsgård, T. (2000). *Aquaculture nutrition* (Vol. 3). John Wiley & Sons.
28. Tidwell, J. H., & Allan, G. L. (2001). Fish as food: aquaculture's contribution. *Ecological applications*, 11(2), 320-332.
29. Rakocy, J. E., Masser, A. J., & Losordo, T. M. (2006). *Recirculating aquaculture tank production systems: Aquaponics—integrating fish and plant culture*. SRAC Publication No. 454.
30. Endut, A., Jusadi, D., Azra, M. N., & Veranita, E. N. (2016). A review of the aquaponic system: Concepts, design, trade-off and future prospects. *Journal of Fisheries and Aquatic Science*, 11(1), 1-16.

31. Somerville C., Cohen M., Pantanella E., Stankus A., Lovatelli A. Small-scale aquaponic food production: integrated fish and vegetable farming. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2014. 262 p. URL: <http://www.fao.org/3/a-i4021e.pdf>.
32. Гончарова О.В. та ін. (2020). *Охорона праці в галузі аквакультури*. Київ: Видавництво "Аграрна наука".
33. Міністерство охорони здоров'я України. Державні санітарні норми та правила "Гігієнічні вимоги до організації робіт з біологічними агентами". ДСН 3.3.1-XXX-20XX.
34. Acquacoltura Italia. Aquaponics: history and benefits. 2016. URL: https://acquacolturaitalia.com/wp-content/uploads/2016/10/aquaponics_history_and_benefits.pdf
35. Третяк О. М. Особливості канібалізму хижих риб в умовах аквакультури. Водні біоресурси та аквакультура: наукове фахове видання. Херсон: Херсонський державний аграрно-економічний університет, 2019. № 2. С. 45–52. URL: <http://wra-journal.ksauniv.ks.ua>.
36. Naylor R. L., Hardy R. W., Bureau D. P., Chiu A., Elliott M., Farrell A. P., Forster I., Gatlin D. M., Goldburg R. J., Hua K., Nichols P. D. Feeding aquaculture in an era of finite resources. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2009. Vol. 106, No. 36. P. 15103–15110. Washington, DC: National Academy of Sciences. URL: <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.0905235106>.
37. Makkar H. P. S., Tran G., Heuzé V., Ankers P. State-of-the-art on use of insects as animal feed. *Animal Feed Science and Technology*. 2014. Vol. 197. P. 1–33. Amsterdam: Elsevier. URL: <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2014.07.008>