



Co-funded by
the European Union



National University of Water
and Environmental
Engineering

Міністерство освіти і науки України
Національний університет водного господарства та
природокористування

Навчально-науковий інститут агроекології та землеустрою
Кафедра водних біоресурсів

05-03-144М

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

з навчальної дисципліни

«Інтегрована мультитрофічна аквакультура»

для здобувачів вищої освіти другого (магістерського) рівня
за освітньо-професійною програмою «Охорона, відтворення та
раціональне використання гідробіоресурсів»
спеціальності 207 «Водні біоресурси та аквакультура»
денної та заочної форми навчання

Рекомендовано
науково-методичною радою
з якості ННІАЗ
Протокол № 2 від 24.09.2024 р..

Рівне – 2024

Конспект лекцій з навчальної дисципліни «Інтегрована мультитрофічна аквакультура» для здобувачів вищої освіти другого (магістерського) рівня за освітньо-професійною програмою «Охорона, відтворення та раціональне використання гідробіоресурсів» спеціальності 207 «Водні біоресурси та аквакультура» денної та заочної форми навчання. [Електронне видання] / Кононцев С. В. – Рівне : НУВГП, 2024. – 93 с.

Укладач: Кононцев Сергій Вікторович, д.т.н., доцент, професор кафедри водних біоресурсів.

Відповідальна за випуск: Полтавченко Т. В. – к.вет.н., доцент, завідувачка кафедри водних біоресурсів.

Керівник групи забезпечення спеціальності 207

«Водні біоресурси та аквакультура»

Сондак В. В.

AFISHE «Development of Aquaculture and Fisheries Education for Green Deal in Armenia and Ukraine: from Education to Ecology»
<https://www.afishe.eu/>

Матеріали опубліковані як частина проєкту ЄС, який фінансується за підтримки Європейської комісії. Ця публікація відображає погляди авторів і Європейська комісія не може нести відповідальності за використання будь-якої інформації, що тут міститься.

© С. В. Кононцев, 2024

© НУВГП, 2024

ЗМІСТ

Вступ	4
Змістовний модуль 1. Інтегрована мультитрофічна аквакультура відкритих водних систем	5
Тема 1. Соціальне та екологічне значення сучасних технологій виробництва продукції аквакультури	5
Тема 2. Теоретичні засади організації інтегрованих мультитрофічних комплексів в межах різних форм господарств аквакультури	11
Тема 3. Процеси біотрансформації, які відбуваються в контурі ІМТА та роль у них різних груп гідробіонтів.	16
Тема 4. Критерії вибору видів риб та рослин для спільного вирощування в інтегрованому комплексі.	23
Тема 5. Просторова сукцесія гідробіонтів ІМТА у відкритих водоймах та способи забезпечення трафіку поживних речовин до спеціалізованих угруповань	30
Змістовний модуль 2. Інтегрована мультитрофічна аквакультура рециркуляційних систем	36
Тема 6. Історія розвитку аквапоніки та сучасні принципи організації виробничих процесів у системі	36
Тема 7. Живлення рослин в умовах аквапоніки та баланс мікро- й макроелементів у системі.	43
Тема 8. Порівняльна характеристика сучасних систем гідропоніки	52
Тема 9. Характеристики субстратів та особливості використання їх у системах гідропоніки.	60
Тема 10. Підтримка балансу системи «рибницький басейн-аквапоніка» на рівні складу поживних елементів та фізико-хімічних показників	69
Тема. 11. Організація раціонального водного режиму та просторової сукцесії об'єктів культивування й очисних організмів в ІМТА	77
Тема 12. Інноваційні рішення у інтегрованих системах аквакультури	85
Література	93

Вступ

Дисципліна «Інтегрована мультитрофічна аквакультура» присвячена новітнім технологіям у галузі, які дозволяють забезпечити стійкий ріст аквакультури з одночасним вирішенням актуальних проблем негативного впливу аквакультури на довкілля та обмеженості біоресурсів. Метою дисципліни є ознайомлення студентів з принципами вирощування об'єктів аквакультури та кормових організмів, рослинницької продукції в межах спільного водного контуру, формування навичок з проектування та управління інтегрованими аквакультурними системами. Цілі: 1. Розширити знання про технології вирощування об'єктів аквакультури, кормових організмів та с/г рослин у системах із оборотним водопостачанням. 2. Дослідити вимоги окремих груп до параметрів середовища та умови процесів їх культивування у спільному водному контурі. 3. Сформуванати навички з розрахунку та проектування інтегрованих аквакультурних систем з оборотним водопостачанням.

Змістовиний модуль 1. Інтегрована мультитрофічна аквакультура відкритих водних систем

Тема 1. Соціальне та екологічне значення сучасних технологій виробництва продукції аквакультури

Аналогічно процесу переходу від полювання до вирощування тварин, людство поступово рухається від вилову риби до вирощування риби. Відповідно до прогнозів ФАО, обсяги аквакультури мають наблизитись до 50% загального споживання риби. У свою чергу, розвиток аквакультури має певні обмеження, пов'язані з дефіцитом прісної води. Тому сьогодні основне зростання продукції аквакультури відбувається завдяки садковим господарствам, розташованим у морській воді. З одного боку, це один з найдешевших способів вирощування риби, але й рівень забруднення навколишнього середовища при такому способі залишається найвищим. Потреба у більш раціональному та ощадливому використанні ресурсів змусило людство у глобальному масштабі оцінити майбутні загрози та наслідки розширення аквакультури за рахунок садкових господарств. Окрім того, забруднення, які у абсолютній більшості являють собою метаболіти риб, варто розглядати також і як незасвоєний рибами енергетичний потенціал кормів.

Таким чином, сформульована наприкінці 20 ст. концепція інтегрованої мультитрофічної аквакультури (ІМТА) стала безальтернативною відповіддю на питання яким чином забезпечити зростаючу потребу у продукції аквакультури без надмірної шкоди навколишньому середовищу та з раціональним використанням енергетичного потенціалу кормів. ІМТА базується на ідеї симбіотичних зв'язків між різними видами організмів, які спільно існують у природних екосистемах. У системі ІМТА вирощуються не лише комерційно цінні види, такі як риба, мідії або креветки, але і інші види, які можуть використовувати відходи перших для свого живлення. Наприклад, вирощування риби може супроводжуватися вирощуванням водоростей або молюсків, які використовують поживні речовини, що виділяються в процесі вирощування риби.

Переваги інтегрованої мультитрофічної аквакультури включають зменшення екологічного впливу, підвищення ефективності використання ресурсів, зниження ризику виникнення водних забруднень та забезпечення більш стабільного та сталого урожаю. ІМТА представляє собою інноваційний підхід, який дозволяє зменшити негативний вплив аквакультури на морське середовище та сприяє створенню більш екологічно стійких систем вирощування.

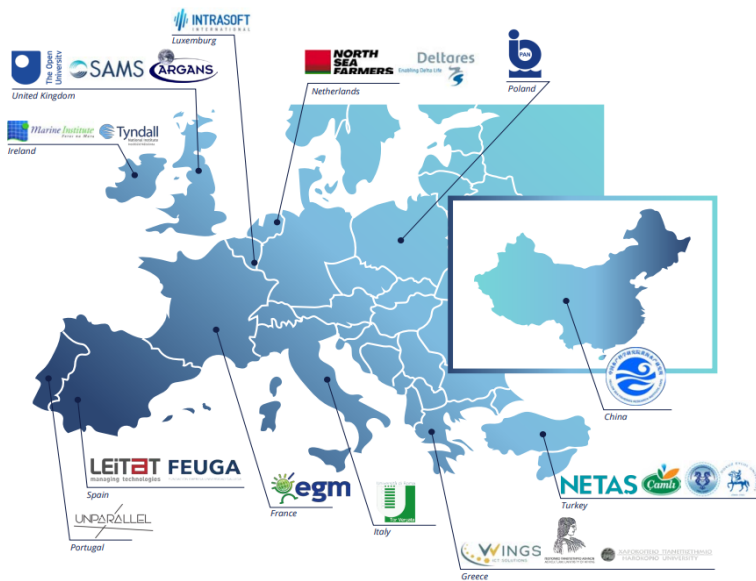


Рис. 1. Центри та об'єднання, які сприяють поширенню концепції ІМТА та популяризації новітніх технологій аквакультури.

Багатьма дослідниками було зазначено, що екстенсивні технології аквакультури характеризувались протіканням у водоймі процесів самоочищення, до яких по-можливості доєднувались різні групи гідробіонтів. Таким чином метаболіти риб виступали як поживні елементи для спеціалізованих очисних

агентів (рослини, мікробіота, моллюски та ракоподібні), що в результаті забезпечувало трансформацію забруднень у біомасу організмів нижчих трофічних ланок з відповідним приростом їх біомаси та мінералізацією органічних сполук. Ті ж самі процеси можуть відбуватись і в морському середовищі, але надмірне і неконтрольоване надходження забруднень від рибницьких ферм несе загрозу стійкості водних екосистем. Окрім того, значна частина цінних компонентів кормів, переважно – біогенних елементів, розсіюється у водному середовищі та суттєво знижує енергетичну ефективність процесу. Слід зазначити, що такі компоненти рибницьких комбікормів, як рибне борошно, кріль, кісткове борошно, мають високу цінність та характеризуються обмеженістю ресурсів. Тобто, не можна сподіватись на ефективний розвиток аквакультури, якщо обсяги вирощування риб будуть критично залежати від кормових інгредієнтів, які надходять завдяки вилову. Окрім дієвих кроків, що дозволили суттєво знизити питому частку таких інгредієнтів у комбікормах, сучасна аквакультура ставить завдання підвищити ефективність використання енергетичного потенціалу кормів. І оскільки змінити біохімічні процеси травлення та виділення риб сучасна наука не в змозі, мова йде про так звану «конверсію» цінних компонентів корму у доступну риbam форму, або цінну для людства продукцію. Вказані задачі можливо реалізувати, якщо поруч з основним об'єктом аквакультури (рибами або ракоподібними) створити умови для розвитку тих видів, або груп організмів, що здатні споживати відходи аквакультури. Таким чином забезпечується додаткова мінералізація метаболітів риб, основні забруднення трансформуються у біомасу тих очисних агентів, які були «інтегровані» до акваферми. Розробка таких інтегрованих комплексів передбачає не тільки пошук тих груп гідробіонтів, яких доцільно культивувати поруч із рибами, але й створення умов для їх інтенсивного розвитку, забезпечення просторової сукцесії тощо. Здебільшого, мова йде про те, що для ефективного протікання процесів конверсії, кожній групі організмів, що долучається до неї, необхідно створити оптимальні умови. Конфігурація комплексу буде залежати також і від типу рибницького господарства, адже беручи початок з

садкової аквакультури ІМТА поширилась і на інтенсивні басейнові господарства з замкнутим циклом водопостачання, і на прибережні акваферми з океанічним живленням. Отже, концепція ІМТА є актуальною для морської та прісноводної аквакультури, але відрізнятиметься технологічними рішеннями через особливості реалізації процесу в різних типах акваферм.

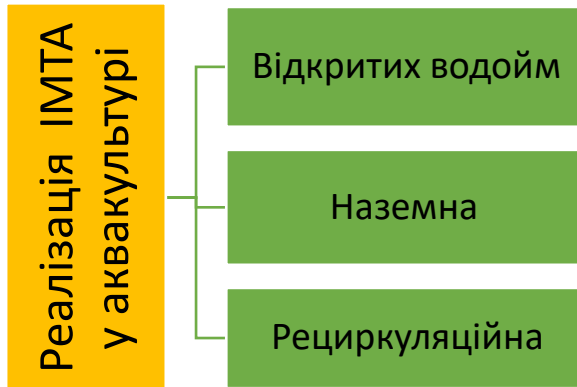


Рис. 2. Основні напрямки реалізації концепції ІМТА в межах сучасної аквакультури.

Суттєві відмінності у технологіях ІМТА пов'язані з особливостями організації процесів вирощування у акваторіях, прибережних водоймах та РАС. Оскільки критично важливою ланкою ІМТА є транспорт метаболітів риб до тих груп гідробіонтів, які їх здатні асимілювати, в умовах садкового господарства споруди для вирощування додаткових культур розміщуються поруч з садками. Наявність постійної течії може частково коригувати розміщення таких блоків, але у будь-якому випадку ефективність транспорту поживних речовин не досягатиме 100% і частина поживних компонентів розсіюється у морській воді. Другим обмежуючим чинником реалізації концепції ІМТА у садковій аквакультурі є проблема утримання гідробіонтів. Тому тут можуть бути задіяні лише доволі крупні

малорухомі організми, які можуть розвиватись в межах підводних садків, вести прикріпленний спосіб життя на інертному носії або зростати прикріпленим до ґрунту. В межах наземної прибережної аквакультури відкриваються додаткові можливості, пов'язані з створенням умов для утримання гідробіонтів в межах закритих водойм, сполучених як компоненти ІМТА. Це дозволяє залучити планктонні організми та з вищим рівнем організації, які неможливо утримати у відкритому морі. Транспорт поживних речовин у таких комплексах забезпечується шляхом перекачування води із однієї водойми до іншої. Потенційними перевагами технології є те, що вона здатна ефективно використовувати природні ресурси, зокрема – океанічну воду і сонячну енергію. Водночас рівень керованості залишається доволі низьким, адже існує залежність від природних чинників (хвилі, несприятливі температури, збудники хвороб, забруднення води). Найбільшою ефективністю характеризуються інтегровані системи на базі РАС, оскільки вони мають технологічні переваги щодо керованості процесів вирощування риби та здатні посилити їх завдяки оптимізації процесів конверсії компонентів кормів.

В умовах прісноводної аквакультури екстенсивні технології апріорі характеризувались наявністю доволі різноманітного біоценозу водойми, і процеси трансформації метаболітів риб відбувались аналогічно природним водоймам. Водночас, значна частина цінних очисних агентів суттєво пригнічувалась внаслідок поїдання рибами, що значно обмежувало самоочисну здатність водойми. Ті гідробіонти, що не зазнавали негативного впливу з боку риб, могли нарощувати у водоймі достатньо значну біомасу. Таким чином створювалась певна екосистема, яка суттєво залежала від людини (штучна аерація, водообмін, видалення мулу з дна водойми), але мала певні можливості щодо саморегуляції. Такі технологічні кроки як «полікультура» дозволяли отримувати з водного плеса додаткову рибницьку продукцію за рахунок тих видів, які відрізнялись харчовими потребами. Водночас, рівень керованості та ефективності щодо конверсії поживних компонентів корму був невисокий, - основна частина біогенних елементів накопичувалась у біомасі водоростей, які наприкінці сезону

відмирили, а елементи депонувались у мулі. Попри усі технологічні переваги РАС у порівнянні з аквакультурою відкритих водойм, важливою проблемою залишався скид у навколишнє середовище забрудненої сполуками нітрогену води, у якій також містились і інші біогенні елементи. Причиною такої проблеми є доволі неефективні для аквакультури технології нітри-денітрифікації. Мікробна складова біофільтрів не асимілює нітроген а лише поетапно його трансформує у різні форми (і амонійного у нітриту, а потім – у нітрата). Подальший процес денітрифікації виявляється доволі витратним та не завжди економічно доцільним. Окрім того, процес фактично завершується втратою цінного біогенного елементу, який у вигляді газу віддувається у повітря. Це набагато краще, ніж забруднити водойму нітратами, але не відповідає концептуальним засадам ІМТА. Тому в межах РАС головною задачею ІМТА є забезпечення асиміляції основного і найбільш токсичного для риб метаболіта.

Таким чином, концепція інтегрованої мультитрофічної аквакультури передбачає створення розгалуженого багатокomпонентного комплексу з вирощування основної культури та декількох додаткових культур, завдяки чому досягається мінімізація впливу на навколишнє середовище та ефективне використання енергетичного потенціалу комбікормів.

Тема 2. Теоретичні засади організації інтегрованих мультитрофічних комплексів в межах різних форм господарств аквакультури

Створення умов для ефективної трансформації біогенних елементів об'єктами інтегрованої аквакультури можливе лише за організації просторової сукцесії таких об'єктів в межах ІМТА. Оскільки ефективність конверсії незасвоєних рибами компонентів корму буде залежати від багатьох чинників, при розробці конфігурації інтегрованих систем необхідно враховувати усі особливості технології аквакультури та місцеві умови.

В аспекті усієї інтегрованої системи незалежно від форми аквакультури можна виділити наступні правила формування її складових елементів:

1. **Принцип пропорційності.** Відомо, що інтегрована аквасистема проектується на основі виробничої потужності блоку аквакультури (потенційне надходження у воду метаболітів риб, залишків кормів, біологічного матеріалу). Отже, гідробіонти блоків додаткових культур мають у повній мірі асимілювати такі відходи рибицького господарства. Введення додаткових поживних речовин у систему може бути обґрунтоване лише необхідністю забезпечення збалансованого живлення блоків додаткових культур. Наприклад, рослини не здатні асимілювати амонійних нітроген через брак у технологічній воді сполук калію (*K* виступає як лімітуючий елемент живлення), внаслідок чого очисний потенціал системи аквапоніки не розкривається на повну потужність.

2. **Принцип прямоточності.** Найкращими технологічним рішенням буде таке, яке забезпечить біотрансформацію забруднень у цінну біомасу очисних агентів в найкоротший спосіб. Будь-який поетапний і багатокомпонентний процес призводить до зростання площ, зайнятих додатковою культурою, зниження ефективності конверсії поживних речовин внаслідок розсіювання енергії при переході на кожний наступний трофічний рівень. Аналогічно, водний контур має бути

максимально лаконічним, щоб уникнути зайвих витрат на перекачування та додаткові споруди.

3. Принцип синхронності. Коливання ритмів життєдіяльності риб протягом доби та інтенсивності водоспоживання є об'єктивною складовою аквакультури, з якою необхідно рахуватися. Світловий день рослинницького блоку має бути узгоджений в часі з режимом годівлі риб. Також більшість господарств характеризуються певною нерівномірністю обсягів забруднень, що пов'язано з процесом росту риб та пропорційним збільшенням обсягів кормів, що вносяться у систему. Після ретельного аналізу таких коливань слід передбачити пропорційне нарощування/зниження потужності кожного з блоків інтегрованої культури.

4. Принцип синергії. Той вплив, який здійснює на водне середовище кожен з блоків інтегрованого комплексу аквакультури, має позитивно відобразитись на стані інших гідробіонтів. При виборі об'єктів, які включатимуться у процеси біотрансформації відходів риб, варто враховувати цей чинник поряд з економічною доцільністю.

Водне середовище є тою ланкою, яка забезпечує транспорт поживних речовин від системи аквакультури до інтегрованих блоків, і саме вода пов'язує ці розмежовані у просторі об'єкти. Із зростанням технологічної складності та рівня відокремленості від зовнішнього середовища зростає і рівень критичної залежності усього комплексу від параметрів води. Найменш контрольованою виглядає садкова аквакультура, де садки розміщені в акваторії і будь-які дієві механізми щодо організації керованого руху води апріорі неможливі. Одна з головних переваг, яка полягає у відсутності витрат на водопідготовку та очищення скидної води, має свою обернену сторону в контексті ІМТА. З точки зору керованості параметрами культивування, садкова ферма має лише один пункт – садок утримує об'єкти культивування у своєму внутрішньому просторі. В інших аспектах вирощування відбувається у природних умовах, куди метаболіти риб у надходять. Єдиним варіантом для реалізації концепції у таких умовах є розташування інтегрованих блоків безпосередньо поруч із садковим господарством. Відповідно, для

біотрансформації тонучих домішок (переважно фекалій та пилоподібної фракції кормів) сіткові загони з кишковопорожнинними розташовують під садками, або дещо віддалено із врахуванням сили та напрямку течії. Аналогічно із врахуванням течії розташовують носії для культивування двостулкових моллюсків та організовують висадку багатоклітинних водоростей. Очевидно, що частина поживних речовин втрачається, не потрапляючи до інтегрованих блоків, тому при проектуванні та розрахунку потужності варто враховувати потенційні втрати. Рівень забруднення навколишніх вод буде відповідати втратам поживних сполук, що не надійшли до інтегрованих блоків та ефективності біотрансформації забруднень, які були асимільовані додатковими культурами.

Прибережні інтегровані господарства мають значно вищий рівень керованості. За умови правильної організації забору морської /океанічної води її практично у повному обсязі можна перекачувати у відокремлені водойми, що являтимуть культиватори інтегрованої системи. Очищення води може відбуватися послідовно у декількох групах ставків, де до асиміляції забруднень будуть долучатися представники рослинного світу, моллюски, ракоподібні. Окрім того, в межах кожного ставка можна організувати полікультуру очисних організмів, якщо це матиме доцільність. В окремих випадках (для культивування планктонних організмів) варто організовувати групи водойм, які заповнюються поперемінно. Таке рішення дозволяє витримати необхідний час для процесу асиміляції забруднень у непроточній водоймі та потім відкачати очищену воду, відділяючи одночасно біомасу очисних агентів. У більшості випадків таку воду повертають у акваторію, або використовують для поливу с/г угідь.

Відокремленість від природного середовища сучасних РАС суттєво розширює можливості щодо організації просторової сукцесії додаткових культур в межах інтегрованої аквасистеми. Через це інтегровані блоки також варто розміщувати у споруді. Проте, з економічної точки зору для холодноводних систем може виявитися доцільним влаштування сезонних культиваторів, розташованих на відкритому повітрі. Таке рішення дозволить

суттєво знизити витрати на вирощування додаткових культур за рахунок використання сонячної енергії, але необхідно також враховувати простій відкритих споруд протягом тривалого періоду кожного року та необхідність відведення додаткових земельних ділянок. У разі, якщо інтегровані блоки додаткових аквакультур розташовуються виключно в одній споруді з РАС, комплекс характеризується відносною компактністю та максимальним рівнем керованості процесів. Особливості реалізації концепції ІМТА в РАС пов'язані перш за все з можливістю максимально точно спрогнозувати обсяги забруднень та співвідношення їх форм, що пов'язано в використанні високоякісних кормів та чітким дотриманням норм годівлі у таких господарствах. Також в водному контурі інтегрованого комплексу чітко підтримуються задані параметри середовища і це дозволяє максимально ефективно реалізувати очисний потенціал гідробіонтів додаткових культур. Окрім того, в інтегрованому з РАС комплексі можна вирощувати також і ті види рослин, які відносяться до наземних або повітряно-водних. Це розкриває додаткові можливості щодо конверсії поживних речовин у біомасу харчової продукції, фармакологічної або декоративної групи. Більшість інтегрованих комплексів на даний час являють собою систему аквапоніки, у якій вирощують харчову продукцію (від різноманітної зелені до томатів, огірків та суниць). Оскільки вважається, що для рослин аквапоніки пріоритетною є нітратна форма нітрогену, до блоку обробки технологічної води входять споруди механічного очищення та біофільтри-нітрифікатори. Потреба у видаленні нерозчинених домішок пов'язана з високим ризиком загнивання кореневої системи внаслідок потрапляння у субстрат органічних сполук. Досвіду функціонування РАС із блоком для культивування будь-яких мінералізаторів вищого рівня організації наразі немає. Враховуючи обмежений комерційний інтерес до потенційної продукції, яка може бути вирощена в РАС як додаткова культура, основні перспективи в даному сегменті пов'язані з можливістю вирощування кормових організмів для аквакультури. Відповідно, пошук нових об'єктів має зосереджувати увагу на

асиміляційному потенціалі, можливостях утримання в межах культиваторів та кормовій цінності.

Основні напрямки удосконалення інтегрованих комплексів на базі РАС. У більшості технологій передбачене видалення нерозчинених домішок з води у спорудах механічного очищення та подальшу їх мінералізацію/зневодення у природних умовах. В контексті ІМТА таке рішення не можна назвати ефективним, адже мінералізація супроводжуватиметься розсіюванням біогенних елементів у навколишнє середовище. Також великі суперечки викликає використання традиційної технології нітрифікації в межах інтегрованого комплексу. По-перше, ефективність процесу нітрифікації в РАС в цілому є доволі низькою. По-друге, за даними багатьох дослідників, водні рослини краще асимілюють амонійний нітроген у порівнянні з нітратами. Також існує небезпека для риб, що процес припиниться на першій стадії і у технологічну воду надійдуть високотоксичні нітрити. У кінцевому варіанті процес нітриденітрифікації є дисимілятивним, тобто відбувається не конверсія нітрогену у біомасу очисного агента, а його вивільнення в повітря у формі газоподібного азоту. Таким чином, в межах інтегрованого в РАС комплексу актуальна для усієї аквакультури задача також має дві основні складові: асиміляція біогенних елементів та мінералізація розчинених та нерозчинених забруднень з максимальною конверсією у цінну біомасу додаткових культур.

Тема 3. Процеси біотрансформації, які відбуваються в контурі ІМТА та роль у них різних груп гідробіонтів

1. Асиміляція сполук нітрогену та фосфору рослинами
2. Мінералізація нерозчинених домішок молюсками-фільтраторами та кишковопорожнинними

Відповідно до філософії організації ІМТА будь-яке виробництво аквакультури має трансформуватись у багатокомпонентний комплекс, так чи інакше пов'язаний водним середовищем, де відбуватиметься перетікання поживних речовин та їх засвоєння залуженими до процесів біотрансформації організмами. Очевидно, що механізми таких процесів будуть схожими з природними, але на відміну від природного середовища, в інтегрованому комплексі буде створено умови для розвитку визначеної групи додаткової культури, визначена їх роль та забезпечено максимально можливу керованість.

1. Представники рослинного світу. Очевидною перевагою культивування гідробіонтів, які є нижчою ланкою в харчовому ланцюгу, є їх ефективна асиміляція поживних речовин та порівняно невисокі поточні витрати. Тому не дивно, що двома домінуючими культурами у світовій марикультурі є екстрактивні морські водорості та молюски-фільтратори (FAO, 2000; Muller-Feuga, 2000; Troell et al., 2003). Лише тільки морська капуста, Ламінарія японська, культивована на ярусних канатах у прибережних водах Китаю, становить більше половини світового виробництва водних рослин. Морські водорості вживають сирими, вареними або обробленими. Багато косметичних і фармацевтичних продуктів також містять полісахариди морських водоростей — агар, карагенан і альгінат.

Беззаперечною перевагою представників рослинного світу перед бактеріями в аспекті видалення з води нітрогенмістких метаболітів риб є пряма асиміляція нітратів та амоній-йону з подальшою трансформацією у біомасу рослини, тоді як нітрифікуюча мікрофлора лише дисимілює нітроген, перетворюючи його у менш токсичну для риб форму. Тому рослини в ІМТА – ключова ланка системи, на яку покладено переведення найбільш проблемного для РАС забруднення у

корисну біомасу. До того ж, значно швидші темпи поглинання азоту водоростями дозволяють на порядок прискорити процес видалення із води сполук нітрогену у порівнянні з мікробними процесами нітрифікації-денітрифікації. Водночас, необхідно враховувати морфологічні відмінності між одноклітинними та багатоклітинними водоростями, оскільки можливості їх іммобілізації та збору (відділення від води) суттєво відрізняються.

Урожаї культивованих морських водоростей та моллюсків з прибережних вод згідно оцінок науковців видаляють майже мільйон тонн білка, з приблизно 150 000 метричними тоннами азоту щорічно (Troell та ін., 2003). Більшість монокультур морських водоростей у відкритих водоймах зосереджено в Азії, Південній Америці і Східній Африці. Тим не менш, вважається, що культивування порфіри та ламінарії має потенціал для створення життєздатної марикультури морських водоростей в ІМТА.

Оскільки садкова аквакультура акваторій не має технічних можливостей утримувати поруч з рибницькими садками одноклітинні водорості, тут уся увага зосереджена на багатоклітинних видах, які вже достатньо добре освоєні як об'єкти культивування. Вибір видів морських водоростей для включення в інтегровану систему аквакультури перш за все ґрунтується на відповідності низці основних критеріїв: висока швидкість росту та високий вміст азоту у тканинах; простота вирощування і контролю життєвого циклу; стійкість до обростань та дії хвороботворних організмів; відповідність між вимогами до параметрів водного середовища та умовами зростання. Крім того, враховуючи потенційні екологічні ризики, водорості повинні належати до місцевих видів. Окрім цих основних критеріїв, на вибір видів водоростей впливатимуть сфери їх використання. Якщо акцент робиться на вартості виробленої біомаси (цінна продукція аквакультури), технологічні рішення будуть орієнтовані на отримання продукції високої якості. Якщо основна увага буде зосереджена на процесі біоремедіації, саме темпи росту будуть найбільш вагомими критеріями. Водночас, оптимальна система включатиме види

морських водоростей, які володіють одночасно двома властивостями.

Швидкість росту значною мірою визначається морфологією водоростей, фітопланктон має беззаперечні переваги у темпах приросту біомаси, так само водорості із тонким листям зростають швидше, ніж види із м'ясистим грубим габітусом. Стосовно темпів поглинання поживних речовин узагальнення проводити важче. Помічено, що високі концентрації біогенних елементів, зокрема нітрогену у формі амонію, сприяють прискореному росту водоростей. Водночас, водорості не проявляють селективної переваги стосовно нітратів, як це характерно для рослин гідропонної системи. Перспективні види повинні дуже добре рости у високих концентраціях поживних речовин, особливо амонію.

Ринок споживачів водоростей на сьогодні охоплює харчову продукцію, терапевтичні засоби, біохімічні речовини, кормові добавки та ін. Найбільш досліджені представники роду *Ulva* вважають одними з найбільш перспективних груп для культивування в ІМТА, оскільки маючи тонке пласке листя ці види характеризуються добовим приростом близько 25%, високий вміст нітрогену у тканинах (5-7%) свідчить про потужний асиміляційний потенціал.

В умовах наземної прибережної аквакультури з'являються можливості для включення у процеси трансформації забруднень одноклітинних водоростей, оскільки зникає як така проблема їх утримання в заданій точці. Для цього прибережна аквакультура використовує неглибокі водойми – ветланди, де створюють оптимальні умови для розвитку водоростей. Забруднена метаболітами вода подається у ветланди з рибницьких або креветкових ставів самопливом або за допомогою насоса. Приріст біомаси водоростей видаляють шляхом відфільтрування (проціджування води). Цей процес є найбільш складним та довготривалим. Найбільшу цінність мають такі види водоростей як хлорела та спіруліна, але можливості їх ефективного культивування також пов'язані і з вимогами до рівня мінералізації. Водночас, умови культивування дозволяють їх охарактеризувати як більш безпечний з точки зору гігієни

продукт, ніж водорості, вирощені на господарсько-побутових стічних водах. Також у ветландах можна вирощувати повітряно-водну рослинність, вибір видів здебільшого залежатиме від кліматичних умов та солоності води.

Реалізація концепції ІМТА в рециркуляційних системах аквакультури в теорії може охоплювати усі групи водоростей, водні та повітряно-водні рослини залежно від солоності води. Позитивні результати культивування окремих видів наземних галофітів підтвердили доцільність заміни традиційних біофільтрів-нітрифікаторів на систему гідропоніки (галопоніки). Водночас, культивування вже відомих багатоклітинних водоростей не виправдовує себе у більшості випадків з економічної точки зору. В умовах прісноводної аквакультури спектр рослин, які можна залучити в якості додаткової культури ІМТА надзвичайно великий. Попередній досвід та існуючі технології гідропоніки дозволяють впевнено стверджувати що це можуть бути овочеві та ягідні культури, різного роду зелень. Окрім того, в інтегрованих комплексах вирощують тропічні повітряно-водні рослини, які мають цінність у декоративній аквакультурі. Таки переваги з'являються завдяки відокремленості від негативного впливу навколишнього середовища і високий рівень керованості процесом дозволяє робити вибір рослин для культивування на основі їх комерційної цінності.

2. Представники безхребетних. Позитивні результати культивування поряд з рибницькими садками цінних груп морських кишковопорожнинних, а також молюсків було відмічено багатьма дослідниками вже достатньо давно. І досвід таких систем, створених як спроби реалізації переваг полікультури у відкритій воді акваторій, зрештою дав поштовх до розвитку ІМТА. Попри те, що культивування молюсків та кишковопорожнинних існувало як відокремлена ланка аквакультури, поєднання відповідно до ІМТА має очевидні переваги у порівнянні з монокультурою. Тому перші технології культивування в інтегрованій аквакультурі таких груп організмів були реалізовані саме у садкових господарствах в акваторіях. Актуальна потреба у залученні «фільтраторів», пов'язана з доволі

великою кількістю дрібнодисперсних домішок, що утворюються в процесі життєдіяльності риб (подрібнені фекалії, фрагменти корму, слиз та ін.). Вони переважно мають органічну природу та несуть доволі потужне навантаження на природну екосистему через високий вміст біогенних елементів. Водночас, конверсія таких органічних сполук у біомасу додаткової культури дозволить підвищити рівень енергоефективності системи, куди включені рослини як асимілятори розчинених неорганічних сполук нітрогену та фосфору. Оскільки у процесах самоочищення природних водойм вагому роль виконують двостулкові моллюски, саме таку «місію» їм передбачено в ІМТА. У морській аквакультурі очевидний пріоритет мають мідії та устриці, тоді як прісноводна ІМТА стикається з проблемами економічного обґрунтування вирощування порівняно малоцінних моллюсків. Аналогічно, у морській аквакультурі дуже поширеним є вирощування цінних видів кишковопорожнинних, що виконують роль фільтраторів; прісноводна ІМТА не має у своєму арсеналі промислово цінних аналогів. У даному контексті прибережна інтегрована аквакультура має дещо ширші можливості, оскільки у водоймах, куди потрапляють нерозчинені метаболіти риб, можна вирощувати не тільки двостулкових моллюсків, а й планктонних ракоподібних-фільтраторів. Подальше вилучення біомаси відбувається шляхом проціджування відведеної води. Основною проблемою реалізації таких технологічних кроків в межах РАС є високий рівень водообміну між основними блоками та проблеми з утриманням в межах споруди планктонних форм гідробіонтів. Одним із варіантів вирішення даної проблеми є укрупнення основної частини нерозчинених домішок, що дозволить їх ефективно відділяти від основного потоку води та залучати до процесів мінералізації інші групи детритофагів. У такому разі від основного потоку води відокремлюють окремий контур з висококонцентрованою муловою сумішшю, і створюють належні умови для розвитку мінералізаторів. Переважно прісноводні гідробіонти, на відміну від морських, будуть мати виключно кормове значення. Але, забезпечивши конверсію поживних речовин з залишків кормів, вони виконують основне завдання

ІМТА, оскільки ефективне згодовування риbam цінних кормових організмів дозволяє заощадити на комбікормах, знизить обсяги скиду біогенних елементів та покращить якість раціону риб. Особливо важливим такий крок буде для годівлі молоді риб, які потребують різноманітних та якісних кормів, надаючи перевагу живим кормам перед гранульованими. Попри все, культивування кормових організмів в інтегрованій РАС стикається з рядом проблем та економічними обмеженнями. Оскільки у біореакторах питома біомаса культивованих гідробіонтів є доволі незначною, виникає потреба у виділенні значних площ під культиватори. Витрати на терморегуляцію пропорційно відобразяться на вартості вирощених кормових організмів. Відповідно, підбір гідробіонтів, які б могли ефективно виконувати функцію мінералізаторів і інтегрованих РАС, є доволі складним і потребує детального аналізу усіх аспектів такого технологічного рішення.

Більшість інтегрованих систем аквакультури обмежуються двома додатковими блоками, які представлені водоростями/рослинами та фільтраторами різного рівня організації. Рослинний блок може включати декілька видів, які не конкурують між собою і добре розвиваються у полікультурі. Окрім того, рослини можуть бути підібрані таким чином, щоб одна група асимілювала забруднення листовою пластиною, а інша – за допомогою кореневої системи. Такі рішення спрямовані у першу чергу на більш глибоке видалення з води різноманітних розчинених форм. Аналогічно до рослинного блоку, за наявності умов, культивують декілька різних видів фільтраторів – двостулкові молюски та гребінці чи водяні огірки. Це також дозволяє забезпечити поглиблену мінералізацію як дрібнодисперсних так і порівняно крупних домішок, що здатні до швидкого осідання.

Таким чином, очевидні переваги технологічного переходу від системи «полікультура» до сучасної інтегрованої інтенсивної аквакультури присутні і в прісноводній, і в морській аквакультурі. Садкова аквакультура акваторії змушена зосереджуватись на багатоклітинних водоростях, тоді як наземні системи аквакультури мають перспективи культивування і

одноклітинних водоростей. Окрім того, високий рівень керованості наземних систем ІМТА дозволяє підвищити рівень конверсії корму, більш ефективно утримувати основні групи культивованих об'єктів та якісно відводити нерозчинені відходи за межі системи. Створення умов для ефективної трансформації біогенних елементів об'єктами інтегрованої аквакультури можливе лише за організації просторової сукцесії таких об'єктів в межах ІМТА. Відповідно, для кожного типу інтегрованої системи необхідно передбачити відокремлені блоки та забезпечити перетікання між ними води з поживними компонентами.

Тема 4. Критерії вибору видів риб та рослин для спільного вирощування в інтегрованому комплексі.

Одним із найважливіших критеріїв підбору морських гідробіонтів для вирощування в інтегрованій в садкове господарство фермі, є ефективність утримання в межах визначеного ареалу. Відповідно, більшість перспективних для додаткової культури видів ведуть прикріплений або малорухливий спосіб життя. Присутність у метаболітах риб розчинених та нерозчинених домішок, органічних та неорганічних сполук зумовлюють потребу у залученні до їх асиміляції різних за типом живлення гідробіонтів. Причому продукти метаболізму додаткових культур також мають пройти процес асиміляції гідробіонтами іншої групи. Тому в межах інтегрованого комплексу садкового господарства акваторії культивують від дох до п'яти груп гідробіонтів (представників рослин, кишковопорожнинних, молюсків, червів та ракоподібних).

Розміщення інтегрованих блоків кожної додаткової аквакультури має відповідати потребам та способу харчування організмів.

Попри численні переваги інтегрованого комплексу у порівнянні з ґрунтовим вирощуванням рослин, існує ряд критичних факторів, які необхідно враховувати при організації таких систем та у процесі підбору видів риб та рослин для спільного вирощування. Сучасна інтенсивна аквакультура характеризується високим рівнем автоматизації основних виробничих процесів, тому окупність інтегрованого комплексу буде також визначатись можливістю оптимізації щодо персоналу. Це пов'язано з тим, що при вирощуванні риб в економічно обґрунтованих обсягах на аквапоніку виділяються достатньо великі площі, і обмеження щодо автоматизації праці потягнуть за собою ризики неефективного функціонування рослинницького блоку.

MACROALGAE:

Laminaria, Saccharina, Sacchoriza, Undaria, Alaria, Ecklonia, Lessonia, Durvillaea, Macrocystis, Gigartina, Sarcothalia, Chondracanthus, Callophyllis, Gracilaria, Gracilariopsis, Porphyra, Chondrus, Palmaria, Asparagopsis and Ulva

MOLLUSCS:

Haliotis, Crassostrea, Pecten, Argopecten, Placopecten, Mytilus, Choromytilus and Tapes

ECHINODERMS:

Strongylocentrotus, Paracentrotus, Psammechinus, Loxechinus, Cucumaria, Holothuria, Stichopus, Parastichopus, Apostichopus and Athyonidium

POLYCHAETES:

Nereis, Arenicola, Glycera and Sabella

CRUSTACEANS:

Penaeus and Homarus

FISH:

Salmo, Oncorhynchus, Scophthalmus, Dicentrarchus, Gadus, Anoplopoma, Hippoglossus, Melanogrammus, Paralichthys, Pseudopleuronectes and Mugil

Рис. 1. Основні групи об'єктів інтегрованої мультитрофічної аквакультури.

При порівнянні гідропоніки та аквапоніки, можна впевнено констатувати, що перша має можливості створити значно кращі умови для зростання рослин: оптимальний субстрат, визначені параметри водного середовища, спеціалізовані добрива. Існування спільного з аквакультурою контуру робить перераховані фактори проблемними для аквапоніки, адже використання субстратів та добрив несе загрозу отруєння риб, а вимоги щодо більшості показників води відрізняються. Тому лише екологічна доцільність та стійкість інтегрованого комплексу обґрунтовують перспективи його подальшого розвитку.

Відповідно до сучасних уявлень про масштабування поєднаних аквапонічних систем розрізняють міні, хобі (10 м² і більше), домашні (в межах власної садиби), маленькі/напівкомерційні та великомасштабні системи. Залежно від розмірів, такі інтегровані комплекси можуть суттєво відрізнитись за своєю конфігурацією та складовими елементами, але обов'язковими блоками в них залишатимуться риби та рослини.

Остаточний вибір видів риб для вирощування в інтегрованому комплексі має бути обґрунтований на основі багатьох чинників, і у багатьох випадках економічна доцільність у вирощуванні одного з об'єктів аквакультури може диктувати певні умови, які або взагалі обмежують перспективи аквапоніки, або змушують підбирати такі види рослин, культивування яких було б можливим за даних умов. Об'єкти аквакультури зазвичай мають пріоритетне значення у таких виробничих системах, тому аквапоніка змушена орієнтуватися на ті параметри середовища, які формуються у рибницьких басейнах. Водночас, якщо головною метою є створення саме інтегрованого комплексу, «важелі впливу» частково перерозподіляються, і на етапі проектування розробляють шляхи успішного культивування як рибницької, так і рослинницької продукції.

Підбір видів риб та рослин для спільного вирощування в інтегрованому комплексі не може бути уніфікованим, оскільки безліч чинників так чи інакше стимулюватимуть або обмежуватимуть певні технологічні рішення. Оскільки продукція аквакультури у натуральному вимірі та у грошовому еквіваленті суттєво переважатиме за рослинницьку, рекомендується відштовхуватись саме від потенційного надходження у водний контур поживних речовин. Іншими словами, виробнича потужність блоку аквакультури та особливості програми годівлі визначатимуть конфігурацію блогу гідропоніки. Так чи інакше, але система «рибницькі басейни – гідропоніка» має бути збалансованою. Це означає, що кількість рослинницької продукції у інтегрованому комплексі має бути такою, щоб максимально повно використати поживні речовини, які надходять від риб. Водночас, комплекс гідропоніки має усі

можливості використати додаткові добрива, за рахунок чого його виробнича потужність суттєво зростає. Обґрунтування такого технологічного рішення має базуватись на попиті на визначену рослинницьку продукцію та тому, що у підживлюючий розчин додаються ті сполуки/елементи, які не надходять у воду як метаболіти риб. У такому разі, додаткові добрива забезпечують збалансований ріст рослин, а отже – підвищують рівень асиміляції метаболітів риб.



Рис. 2. Чинники, що спливають на ефективність вирощування рослинницької продукції в аквапоніці.

Більшість риб, що вирощують у холодноводних РАС, характеризуються дещо нижчими обсягами відходів пропорційно до згодованого корму у порівнянні з представниками тепловодних РАС. Тому окремі автори наголошують на пріоритеті саме холодноводних риб при виборі видів для спільного вирощування. Насправді, обсяги відходів суттєво залежать і від якості кормів, які згодовуються риbam. Очевидно, що при годівлі осетрових або форелі, які вирощують у холодноводних РАС, використовують корми вищої якості, з підвищеним вмістом протеїну. Тому й відходів від такого корму

прогнозовано буде значно менше, але його ціна – значно вищою. Температурний чинник також впливає і на перебіг процесів нітрифікації. У тепловодних РАС можна очікувати, що процеси нітрифікації будуть суттєво уповільнюватись при температурі в очисних спорудах в межах 26-28°C, тоді як саме такий діапазон є оптимальним для зростання кларієвого сома чи більшості порід тиліпій. Несприятливим такий температурний режим виявиться і для більшості рослин, що змусить робити аналіз стосовно доцільності розбавлення чи охолодження.

Риби із підвищеними вимогами до фізико-хімічних параметрів водного середовища відносяться до найбільш проблемних для інтегрованих комплексів, адже надходження у воду залишкових концентрацій добрив, неефективна асиміляція сполук нітрогену рослинами чи уповільнення нітрифікації у очисних спорудах несуть найбільші ризики саме для такої групи риб. Досвід успішного вирощування у спільному контурі кларієвого сома чи окремих видів тиліпій з рослинами довів перспективність створення таких інтегрованих господарств за умови організації ефективного відділення з потоку води нерозчинених забруднень.

Найбільш відпрацьовані технології спільного вирощування риб та рослин у системах з оборотним водопостачанням стосуються найбільш масових об'єктів аквакультури: кларієвого сома та тиліпій. Широка популярність даних видів, пов'язана з високою пристосованістю до умов утримання та одними з найшвидших темпів росту, зумовила інтерес щодо розвитку інтегрованих систем аквакультури саме у цьому напрямку. Підбір видів рослин, які можна було б успішно культивувати в умовах спільного контуру, базувався у першу чергу на пристосованості рослин до порівняно високих температур води та на економічній доцільності. На основі отриманих результатів експериментальних досліджень отримували певні залежності темпів приросту біомаси рослин одночасно з динамікою зниження концентрацій у воді основних біогенних елементів. У подальшому на основі балансу поживних речовин та гідравлічного балансу отримували рекомендовані розміри гідропонної системи або біомасу рослин, які доцільно

культивувати у інтегрованому комплексі. Достатньо часто переваги у темпах росту одних видів рослин були нівельовані доволі низькою комерційною ціною або обмеженим попитом. У такому випадку перевагу надавали менш пристосованим до таких умов видам, вибір яких був би раціональним з «комерційної» точки зору. Більшість рослин, включених у спільний контур, не представляють загрози риbam через власні обмінні процеси. Результати експериментальних досліджень підтвердили позитивний вплив рослин на самопочуття риб. Це пов'язано з розвитком корисної мікрофлори на кореневій системі рослин, виділенням рослинами певних сполук (ферменти, органічні кислоти, фосфатази, цукри, вітаміни, амінокислоти, пурини, нуклеозиди), що позитивно впливають на стан риб. Такі культури як огірок, базилік виявили суттєве зниження станів стресу у кларієвого сома, що позитивно відображалось на його темпах росту.

Можливість організації відокремлених контурів обробки води чи мулистих сумішей, ефективні технології терморегуляції та місцеві переваги господарства можуть суттєво розширити асортимент рослинницької продукції.

1. Організація вирощування рослин з коротким технологічним циклом дозволяє досягти максимальної асиміляції поживних речовин з оборотної води та ефективно варіювати залежно від коливань споживання корму і води аквакультурою.
2. На відміну від риб, в інтегрованому комплексі полікультура рослин забезпечує кращі результати вирощування.
3. Вирощування плодкових культур потребує ретельного аналізу балансу макро- та мікроелементів і зазвичай передбачає використання підживлюючих розчинів. Тому вкрай важливим є організація відокремлених контурів а також вирощування швидкоростучої зелені у полікультурі.
4. Падіння попиту на більшість рослинницької продукції у весняно-літній період необхідно враховувати у плануванні діяльності господарства. Технологічні рішення мають бути економічно обґрунтовані та не спричиняти обмежень у виробництві продукції аквакультури.

5. Чим більше відокремлених контурів має інтегрований комплекс, тим більше можливостей виникає для успішного вирощування в ньому різних видів риб та рослин. На противагу, сполучена система з одним контуром має найбільші обмеження щодо спільного вирощування продукції аквакультури та рослинницької продукції.
6. Рослини, придатні для вирощування без субстрату є більш перспективними в інтегрованому комплексі, оскільки використання поживного субстрату несе додаткові ризики для аквакультури, і інертні субстрати мають доволі високу вартість.

Тема 5. Просторова сукцесія гідробіонтів ІМТА у відкритих водоймах та забезпечення трафіку поживних речовин до спеціалізованих угруповань

Більшість відкритих систем ІМТА розташовані у акваторіях морів чи узбережжі океанів, а основний об'єкт аквакультури, - риба, вирощується у садкових лініях. При розробці архітектури комплексу ІМТА технолог має приймати до уваги наступні чинники, які пов'язані з течіями, силою та напрямками вітрів, глибиною у місці розташування садків, характером донного ґрунту. Оптимально виглядатиме, якщо трансформація продуктів метаболізму відбуватиметься у декілька етапів, хоча найбільш ефективно з точки зору енергетичних втрат перетворення залишків кормів чи продуктів життєдіяльності у біомасу очисних агентів відбувається за один етап. Водночас, при функціонуванні комплексу ІМТА у відкритій водній системі забезпечити такий перехід навіть теоретично вкрай складно. Також найбільшою проблемою відкритих водних систем є те, що в них неможливо здійснити цільовий транспорт поживних речовин разом із забрудненою содою саме до цільової групи залучених в ІМТА організмів. Отже, для будь-якого комплексу, розташованого на відкритій воді, постає питання яким чином створити умови для максимального «перехоплення» потенційно цінних сполук, що у вигляді відходів надходять з рибницьких садків. Відсутність дієвих механізмів щодо регулювання фізико-хімічних параметрів води для будь-якого окремого блоку ІМТА обмежує вибір об'єктів культивування лише тими видами, які здатні краще пристосуватися до існуючих умов і здатні витримати потенційні коливання параметрів вирощування, пов'язані із погодними явищами. Певну проблему у реалізації концепції інтегрованої мультитрофічної аквакультури у відкритій воді створюють також потенційні конкуренти, хижаки та паразити, присутні у природному середовищі. Якщо садок захищає культивованих риб від нападу крупного хижака, то від збудника хвороби він захистити не здатний. Інтегровані блоки додаткових культур наражаються на аналогічну небезпеку з ризиками, що

пропорційні рівню захисту блоків від негативних чинників та стійкості самих об'єктів.

Враховуючи відмінності у складі та властивостях відходів, вони у різний спосіб поширюватимуться навколо садків. На основі фазово-дисперсного стану відходів, який фактично буде характеризувати їх властивості у водному середовищі, варто виділити на три основні групи: пилоподібні частки кормів, недоступні риbam (мають дрібні розміри і погано осідають), розчинені метаболіти риб (переважно сполуки Нітрогену та Фосфору) та порівняно крупні відходи, представлені переважно фекаліями риб, слизом, лускою (здатні швидко осідати). Відповідно, враховуючи фазово-дисперсний стан таких домішок, необхідно передбачити як мінімум три групи гідробіонтів, які мають бути включені до комплексу як групи первинної трансформації. Наприклад, розчинені метаболіти, основний потік яких буде рухатись за течією води, мають надійти до водоростевих чеків, де найбільш ефективно будуть вилучені фосфати та амонійний Нітроген. Попри те, що мікроскопічні обростання водоростей також прийматимуть участь у деструкції органічних забруднень, сорбованих поверхнею обростань, їх внесок у системі ІМТА буде мінімальний, а можливість контролю процесу взагалі відсутня. Необхідно враховувати, що також у воду надходитиме Нітроген і Фосфор, що утворюватимуться внаслідок життєдіяльності інших видів водних тварин, включених у комплекс ІМТА. Якщо висота рослин дозволяє перекрити усю товщу води навколо садків, виникає можливість створення «коридорів» які забезпечать спрямований рух води до наступного блоку ІМТА, або формування певних локальних ділянок, у яких будуть розміщені ті чи інші групи гідробіонтів. Враховуючи, що розчинені метаболіти риб швидко поширюються у водному середовищі, забезпечити ефективно їх «перехоплення» поруч з кожним окремо розташованим садком виявляється практично неможливим. Тому насадження водоростей розташовують паралельно лініям садків нижче за напрямком течії. Також водоростеві блоки можуть повністю охоплювати по периметру садкове господарство, забезпечуючи більш високий рівень засвоєння розчинених метаболітів риб

навіть при змінних течіях у місці розташування садків. Єдиним обмежуючи чинником у такому випадку є лише необхідність забезпечення руху до садків обслуговуючих плавзасобів. При вирощуванні водоростей на вертикально розташованих носіях вони також можуть змінювати розташування залежно від течії та забезпечувати достатню густину у водному середовищі. У разі, якщо глибина води у місці встановлення садків достатньо велика, і у дефіцит світла у придонних шарах не дозволить ефективно вирощувати водорості, носії розміщуються біля поверхні на плавучих платформах, закріплених поблизу садків.

Пилоподібні залишки кормів та дрібнодисперсні відходи риб через низьку швидкість осідання в основній масі вивільнятимуться із садка назовні через бічні стінки. Цьому процесу сприятиме течія води та рух риб у садку. За своїм складом ці домішки будуть мати переважно органічний характер. До того ж, недоступні риbam дрібні часточки корму матимуть найвищий енергетичний потенціал серед усіх груп забруднень. Потенційними об'єктами муьльтитрофічної аквакультури, які було б доцільно включити у ланцюг трансформації забруднень, можуть бути молюски-фільтратори, кишковопорожнинні та поліхети. Вибір конкретних видів має базуватися на їх комерційній цінності, можливостях вирощувати у конкретних умовах. Включення у комплекс ІМТА водних тварин потребує вирішення питання їх іммобілізації та утримання.

Такі молюски, як мідії, можна успішно вирощувати на волокнистому носії, без необхідності вжиття заходів для попередження міграції молюсків. Відповідно, блоки для культивування з вертикально розташованими носіями розміщують навколо садка/садків або у лінію поруч з групою садків. Для культивування гребінців використовують довгі сітки, які унеможливають вихід молюсків з культиватора. Їх також розміщують нижче за течією поряд із садками або охоплюють господарство по периметру. Достатньо часто за наявності виражених течій у місцях розташування садків носії з молюсками розміщують безпосередньо поруч із рибницькими садками, розміщуючи водорості як наступний блок ІМТА. Таке рішення обгрунтовується більш ефективним «перехопленням» дрібних

органічних часток, що надходять з басейну. До того ж, моллюски також, як і риби, виділяють амонійний Нітроген, який додається до вже наявного у воді і лише тоді надходить до водоростей.

Більш рухомі представники червів та кишковопорожнинних також мають бути іммобілізовані в межах блоку додаткової аквакультури. Виключення можуть становити лише господарства у порівняно малих бухтах, де простір для міграції таких гідробіонтів обмежений. Водночас, при використанні компактних споруд для культивування таких груп, зручність «збору врожаю» значно зростає, прискорюється процес вилову та презавантаження носія.

Достатньо ефективним показало себе технічне рішення, що передбачає розміщення сіткової ємкості з морськими огірками безпосередньо під рибницьким садком. Кишковопорожнинні залишаються в межах свого садка, оскільки не здатні подолати достатньо високі сітчасті стінки. У садок надходить основна маса порівняно крупних домішок, здатних швидко осідати. Окрім фекалій риб, тут також міститимуться недоступні риbam дрібні залишки корму. Отже, за умови, що у водному середовищі не з'являться потенційні конкуренти чи хижаки, які живляться даними видами кишковопорожнинних, процес трафіку та наступної трансформації домішок відбуватиметься із найнижчим рівнем втрат поживних компонентів. У більшості господарств на відкритій воді другий рівень трансформації знов утворених відходів чи поглиблення рівня мінералізації вже перероблених домішок не передбачається, хоча частково він може протікати як некерований процес (асиміляція водоростями сполук Нітрогену та Фосфору, утвореними у культиваторах моллюсків чи кишковопорожнинних).

Одним з важливих чинників, який характеризуватиме рівень трансформації утворених відходів, є можливість спрямування водного потоку від блоків додаткових культур до рибницьких садків. У такому випадку негативний вплив на навколишнє середовище буде мінімізовано, та з'явиться можливість асимілювати ті, поживні речовини, які залишилися у воді після контакту з блоками додаткових культур або

утворилися в процесі трансформації первинних відходів. Реалізація такої циркуляції води можлива лише у разі розміщення господарства у невеликих бухтах чи лиманах.

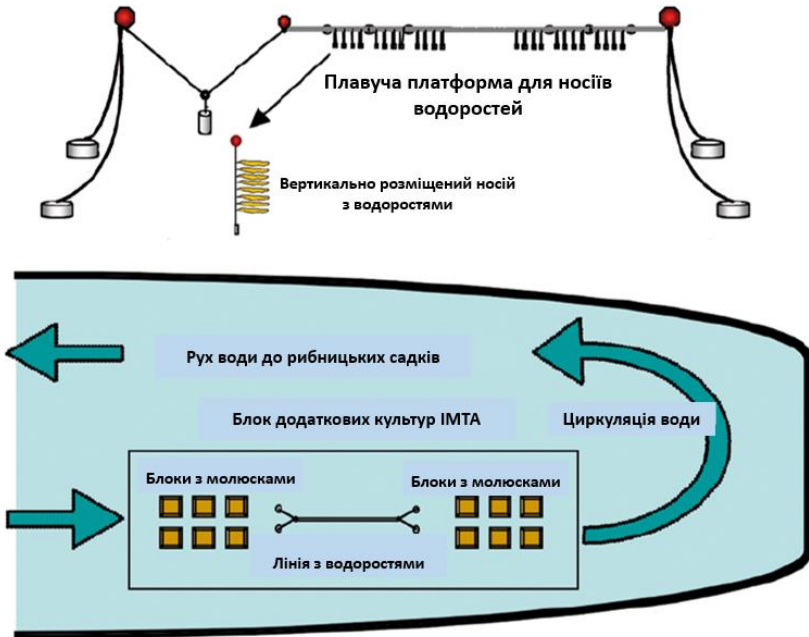


Рис. 1. Схема розміщення блоків додаткових культур відносно течії води у господарствах, розміщених в акваторіях.

Додаткові переваги для ІМТА з'являються на прибережних ділянках з неглибоким рівнем води. У таких місцях обмежений доступ хижаків та є зручні умови для проведення багатьох операцій без використання плавзасобів. До того ж, неглибока вода дозволяє більш ефективно контролювати процеси росту додаткових культур. У таких ділянках можна вирощувати як більшість кишковопорожнинних, так і водорості.

Таким чином, залежно багатьох чинників, кількість блоків додаткових культур ІМТА, їх взаємне розташування та співвідношення можуть суттєво відрізнятись. У разі, якщо на



Co-funded by
the European Union



National University of Water
and Environmental
Engineering

першому місці стоїть комерційна вигода – перевагу надають більш цінним видам, реалізація яких дозволить підвищити економічну ефективність акваферми. Якщо ж за пріоритет обрано екологічну складову, то блоки додаткових культур проєктують таким чином, щоб максимально повно вилучити з води потенційні забруднення, утворені у рибницькому садку.

Змістовний модуль 2. Інтегрована мультитрофічна аквакультура у системах з рециркуляцією

Тема 6. Історія розвитку аквапоніки та сучасні принципи організації виробничих процесів у системі

Останні дослідження показують, що сучасні рішення щодо підвищення врожайності сільського господарства будуть недостатніми, щоб задовольнити прогнозований світовий попит на продовольство до 2050 року. Відповідно, цим пояснюється необхідність додаткового розширення сільськогосподарських площ. Проте, широкомасштабна деградація земель у поєднанні з іншими екологічними проблемами, суттєво ускладнює таке завдання. Землі сільськогосподарського призначення наразі охоплюють більше однієї третини світової суші, але менше третини їх є орними (приблизно 10%). За останні три десятиліття доступність сільськогосподарських угідь повільно зменшувалася, про що свідчить скорочення з 1970 по 2013 рр. на понад 50%. Наслідки втрати ріллі бути не можливо виправити шляхом перетворення природних територій на сільськогосподарські угіддя, оскільки це дуже часто призводить до ерозій, а також втрати середовища існування. Оранка спричиняє втрату верхнього шару ґрунту через вітер та водну ерозію, що тягне за собою зниження родючості ґрунту, зростання потреби у добривах, і зрештою до деградації землі. Втрачений ґрунту з землі може потім потрапити в ставки, дамби, озера та річки, завдаючи шкоди цим екосистемам.

Водночас, світове населення швидко зростає, урбанізується та стає більш заможним. Також змінюються й моделі харчування, що наразі створює підвищений попит на харчові продукти, виробництво яких супроводжується інтенсивними викидами парникових газів, (м'ясні та молочні продукти, з відповідно більшими вимогами до землі та ресурсів). Але в той час як глобальне споживання зростає, доступні світові ресурси, тобто земля, вода та мінерали, залишаються обмеженими. Якщо проаналізувати повний життєвий цикл різних харчових продуктів, то можна припустити, що зміна дієти може бути більш

ефективним засобом зниження кліматичного сліду середнього домогосподарства, пов'язаного з їжею, ніж харчування «місцевою» продукцією. Таким чином окремі автори переконують, що замість того, щоб розглядати скорочення ланцюгів поставок, варто стимулювати перехід від м'яса та молочних продуктів до продуктів харчування, орієнтованих на більш ефективне використання енергії та зниження екологічних слідів (Engelhaupt 2008; Garnett 2011).

Складність дисбалансу між попитом і пропозицією посилюється погіршенням умов навколишнього середовища, що ускладнює виробництво їжі та /або не забезпечує прогнозованих результатів у багатьох регіонах світу. Всі ці фактори призводять до того, що глобальна продовольча система втрачає свою стійкість і стає дедалі нестабільнішою (Suweis et al. 2015). Отже, зміни клімату, втрата родючих земель та її зниження її якості, ускладнення харчових ланцюгів, зростання міст, забруднення та несприятливі умови навколишнього середовища змушують до пошуку нових шляхів економічного вирощування поживних продуктів харчування та варіантів розміщення харчових виробництва ближче до споживачів. Поставлені завдання розвитку у 21 тисячолітті мають забезпечити зменшення відходів, вуглецевих і екологічних слідів, тому аквапоніка є одним із тих рішень, яке має потенціал для досягнення цих цілей. Аквапоніка — це технологія, яка є однією з складових широкого сільськогосподарського напрямку, відомого як інтегровані агро-аквакультурні системи (IAAS) (Gooley and Gavine 2003). Ця дисципліна складається з інтеграції практик рециркуляційної аквакультури із рослинницьким сільськогосподарським виробництвом. Екологічним обґрунтуванням інтегрованих систем сільського господарства та аквакультури є використання переваг ресурсів, які спільно використовуються між аквакультурою та рослинництвом (вода та поживних речовин), щоб розвивати та досягати економічно життєздатного та екологічно більш стійких технологій виробництва (Gooley and Gavine 2003). По суті, системи вирощування наземних рослин і водних тварин мають спільний ресурс: воду. Рослини, як правило, споживають воду завдяки кореневій системі і шляхом

транспірації виділяють його в навколишнє середовище, тоді як риби, здебільшого, менше споживають воду, але їхнє культивування утворює значну кількість забруднених метаболітами потоків води. Тому аквакультура може бути інтегрована у контур водопостачання рослинництва, що дозволить отримувати дві культури (рибу та рослини). Головною перевагою такої інтегрованої системи є можливість використання відходів, що утворюються при вирощуванні риб (переважно їх метаболітів) в якості поживних сполук для рослин, забезпечивши їх базові потреби у макроелементах.

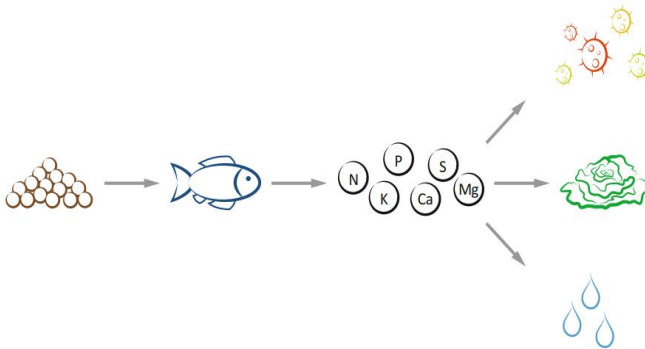


Рис. 1. Шлях трансформації енергії поживних речовин у системі аквапоніки.

Переваги, отримані завдяки інтеграції аквакультури з рослинницькими комплексами були узагальнені Гулі та Гевіном (2003):

1. Збільшення продуктивності та прибутковості ферми без будь-якого збільшення споживання води.
2. Диверсифікація ферми на більш цінні культури, включаючи високоцінні водні види.
3. Повторне використання ресурсів, які інакше витрачаються на фермі (наприклад, трансформація та повторне використання поживних речовин і води).

4. Зменшення негативного впливу напівінтенсивного та інтенсивного землеробства на навколишнє середовище.
5. Економічні вигоди, пов'язані з дотаціями, цільовими компенсаціями операційних витрат чи капіталовкладень.

Вважається, що аквапоніка виникла на основі відносно давньої практики землеробства, пов'язаної з інтеграцією вирощування риби з рослинництвом. Яскравим прикладом такого досвіду є землеробство на затоплених рисових полях Південно-Східної Азії та південноамериканських плавучих островів - чінампів. Попри те, риби у таких системах не відігравали великого значення, їх кількість була відносно мала для реального забезпечення потреб рослин у поживних речовинах. У даних прикладах позитивний ефект досягався скоріше за рахунок евтрофних озерних відкладень, які сформувались вже до початку культивування рослинницької продукції.

Сучасна аквапоніка виникла в США в 1970-х роках і розвивалася спільно з іншими формами, зацікавленими у більш стійких методах ведення сільського господарства. Тому прабатьком сучасної аквапоніки вважають Джеймса Ракочі та його однодумців з Університету Віргінських Островів, які на початку 1980-х років розробили концептуальні засади даного напрямку рослинництва.

Аквапоніка зараз вважається новою індустрією, що розвивається, і займає відповідне місце у ширшому, більш глобальному контексті сільськогосподарського виробництва. Сьогодні існує ряд таких варіацій технології інтеграції рибництва з культурою водних рослин, що спільно визначаються під брендом або назвою аквапоніки. Таким чином, аквапоніка прагне інтегрувати аквакультуру з гідропонним виробництвом рослин із використанням різних методів розподілу ресурсів (води та поживних речовин) між основними компонентами виробництва для вирощування об'єктів аквакультури та рослинної продукції. Субстратне вирощування означає, що аквапоніку часто визначають просто як «...поєднання виробництва риби (аквакультури) та гідропоніки безгрунтового вирощування рослин при сполученій або відокремленій циркуляції води» (Knaus and Palm 2017). Це широке визначення робить наголос на

інтеграції апаратного забезпечення, обладнання чи технологій. Історично аквапоніка, як поєднання слів «аквакультура» та «гідропоніка», була охарактеризована лише як поєднання аквакультури та гідропонного виробництва рослин (Rakocy and Hargreaves 1993), тому сучасні технології асоціації з ґрунтовою культурою здаються не зовсім відповідними. Таким чином, й термін аквапоніка є більш коректним стосовно опису постачання поживних речовин, динамікою та розділенням, і не зовсім коректним відносно технології, обладнання чи устаткування. Більш широке визначення, як правило, було представлено у науковій публікації Ракочі та його команди у 2004 р.: «Аквапоніка - це комбіноване вирощування риб і рослин у замкнутих рециркуляційних системах». Проте воно ґрунтувалось лише на підході до системи як повністю рециркульованій, з одним контуром водозабезпечення. Подальший розвиток теорії та практики зумовив певні корекції у термінології, що відзначилось у назві Graber and Junge (2009): «Аквапоніка - це особлива форма рециркуляційних систем аквакультури (RAS), а саме а полікультура, що складається з аквакультури і рослинництва, які культивуються у відокремлених водних контурах». Сучасні підходи до організації вирощування рослинницької продукції спільно з аквакультурою дещо змінили наголос у бік застосування багатьох контурів, у тому числі частково роз'єднаних. Технічні рішення, спрямовані на оптимізацію умов вирощування та максимально глибоке використання наявних ресурсів і джерел енергії перетворили класичну замкнуту систему аквапоніки на багатоконтурну розгалужену структуру з декількома відокремленими функціональними блоками. Тому сучасна аквапоніка вже представляється як «...система виробництва водних організмів і рослин, де більшість (> 50%) поживних речовин, що забезпечують оптимальний ріст рослин, надходять з відходами, що утворюються під час живлення водних організмів». Таке визначення чітко зміщує наголос на аспект спільного використання поживних речовин у технології. Тому незалежно від організації та кількості водних потоків головною умовою є

саме можливість вирощувати рослинницьку продукцію, використовуючи продукти метаболізму аквакультурної системи.

Відповідно до сучасних підходів аквапоніка характеризується як інтегрований мультитрофічний підхід до виробництва харчової продукції, що включає принаймні рециркуляційну систему аквакультури (RAS) і інтегрований блок гідропоніки, де циркулююча вода розподіляється в певній конфігурації між двома блоками. Важливо, що не менше 50% поживних речовин, що надходять до рослин, повинні бути отримані з відходів риблицького блоку. Таке визначення фокусує увагу на аспектах розподілу поживних речовин та їх динаміці, а отже, зосереджено саме на перевагах, які часто асоціюються з аквапонікою: економія води, ефективність використання поживних речовин, знижений вплив на навколишнє середовище, стійкість). Очевидно, що майбутні виклики будуть спонукати до пошуку технологічних рішень, що забезпечать підвищення рівня споживання рослинами саме відходів з риблицьких басейнів, зниження потреб у воді та підживлюючих розчинах. Розвиток техніки та економічні чинники можуть стати причиною певних видозмін та розвитку таких інтегрованих комплексів, адже їх ключовою задачею є насичення ринку продовольством без суттєвого зростання обсягів використаних ресурсів.

Відповідно до сучасних уявлень про аквапоніку, виокремлюють основні принципи, на яких має базуватись інтегроване господарство (Леннард і С. Годдек):

1. Найважливішим принципом аквапоніки є використання відходів, які утворюються

У процесі життєдіяльності риб, як основного джерела поживних речовин для рослин. Власне, в цьому і полягає вся ідея аквапоніки, і тому вона має бути рушієм першого порядку для цього методу. Історично аквапоніка розглядалася як система вирощування рослин з використанням відходів рибної аквакультури з метою, щоб зменшити вплив на навколишнє середовище та отримати додаткову продукцію, а проблеми з утилізацією відходів відповідно до екологічних норм.

2. Розробка системи повинна заохочувати використання технологій аквакультури та культивування рослин, які за своєю

суттю не мають надмірного водоспоживання, не призводять до деструктивного забруднення води та не витрачають цінні поживні ресурси. Тому системи аквакультури з використанням водойм з природним дном, які суттєво обмежують можливості трансформації відходів риб та знижують ефективність використання води та поживних компонентів, не розглядаються як компоненти сучасних систем ІМГА. Аналогічно, гідропонні методи культивування рослин не повинні використовувати такі субстрати, які поглинають надмірну кількість поживних речовин, або роблять їх недоступними для рослин.

3. Конфігурація системи не повинна витратити поживні речовини або воду у процесі виробництва

Із зовнішніми потоками відходів. Ефективність системи може оцінюватись виходячи з обсягів води та поживних речовин, які виводяться із інтегрованого водного контуру. Також важливим є використання такої води та сполук, що в ній містяться для живлення сільськогосподарських угідь, зменшуючи негативний вплив на навколишнє середовище.

4. Система повинна бути розроблена так, щоб максимально знижувати або, в ідеалі, повністю позбутися скиду поживних речовин у навколишнє середовище. Оскільки першочерговою метою аквапоніки є використання відходів, які виробляє риба, слід забезпечити умови для їх максимальної асиміляції рослинами. Ді сполуки, які залишаються недоступними для рослин мають бути трансформовані у спеціалізованих очисних спорудах з метою вивільнення додаткової енергії.

5. Конструкції аквапонічної системи повинні ідеально розміщуватись всередині екологічно контрольованого комплексу. Це дозволяє досягти найкращих показників продуктивності риби і рослин із системи. Більшість аквапонічних комплексів характеризуються високими капітальними витратами та поточними витратами на виробництво, а отже, оптимальне розміщення споруд підвищить потенціальний прибуток та фінансово виправдає обсяги фінансових вкладень.

Тема 7. Живлення рослин в умовах аквапоніки та баланс мікро- й макроелементів у системі

1. Особливості фізіології живлення рослини через кореневу систему
2. Основні поживні речовини, їх роль і можливі антагонізми
3. Контроль вмісту поживних речовинам відповідно до вимог рослин

Функціонування системи аквапоніки, інтегрованої в РАС потребує чіткого контролю та корекції багатьох параметрів водного середовища. До того ж, ефективне вирощування рослинницької продукції в інтегрованому комплексі буде можливе лише за умови забезпечення на належному рівні усіх основних складових (хімічний склад води, температура, рівень освітлення). Найбільш проблемним чинником у даній тріаді виступає саме склад води, адже рівень освітлення ніяким чином не лімітується параметрами водного середовища, а температуру води в певних діапазонах можна змінювати залежно від вимог об'єктів культивування. Відповідно, аналіз хімічного складу води, яка подається від рибницьких басейнів до системи аквапоніки, дозволить прогнозувати дефіцит або надлишок певних елементів у системі, розрахувати потреби у добривах чи підживлюючих компонентах, запроєктувати споруди для водоочищення.

1. Особливості фізіології живлення рослини через кореневу систему. Серед основних механізмів живлення рослин найважливішим є поглинання (асиміляція), яка для більшості поживних речовин відбувається в іонній формі після гідролізу солей, розчинених у живильному розчині. Коренева система є основним органом рослини, який бере участь у засвоєнні поживних речовин. Аніони і катіони поглинаються з живильного розчину, і, потрапивши всередину рослини, вони спричиняють вихід з тканин йонів водню або гідроксилу (ОН⁻), що забезпечує електрохімічний баланс. Цей процес підтримки іонної рівноваги може викликати зміни рН водного розчину пропорційно до кількості та якості поглинутих поживних речовин. Тому

важливу задачею оператора системи є забезпечення адекватної буферної ємності системи та правильний вибір добрив.

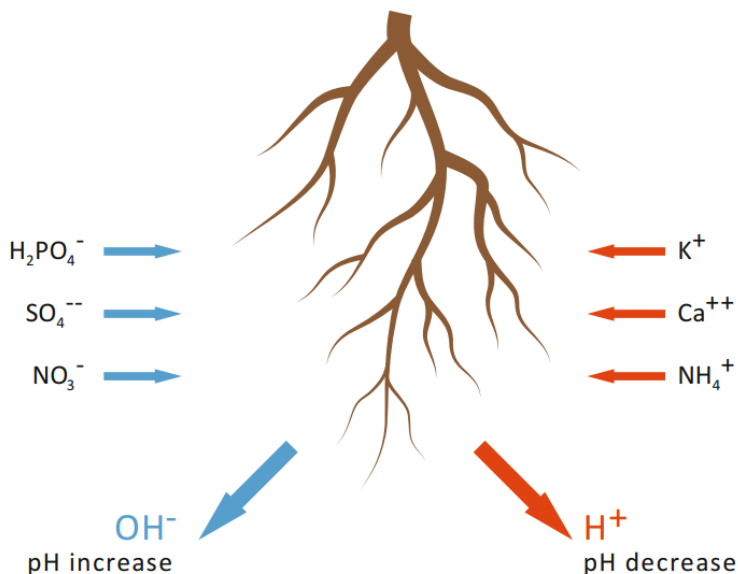


Рис. 1. Основні катіони та аніони, що засвоюються кореневою системою рослини.

Зміна рН внаслідок використання добрив пов'язана з різними хімічними формами використовуваних сполук. У випадку N, наприклад, найбільш часто використовуваною формою є нітратний азот (NO_3), але коли рН потрібно знизити, азот краще подавати у вигляді амонію азот (NH_4^+). Ця форма під час поглинання рослиною, індукує вивільнення H^+ і, отже, підкислення середовища.

Кліматичні умови, особливо температура повітря та субстрату та відносна вологість, справляють великий вплив на поглинання поживних речовин (Pregitzer and King 2005; Masclaux-Daubresse та ін. 2010 рік; Маршнер 2012; Кортелла та ін. 2014). У більшості рослин найкращий ріст досягається за умови, що температурна різниця між субстратом і повітрям є

незначною. Однак надмірно високий рівень температури в кореневій системі має негативний ефект. Занадто низька температура знижує інтенсивність поглинання N (Dong et al.2001). У той час як NH_4^+ ефективно асимілюється при оптимальних температурах, при низьких температурах темпи бактеріального окислення зменшуються, спричиняючи накопичення в рослині, що може спричинити симптоми токсичності та пошкодження кореневої системи та біомаси повітряного шару. Також низькі температури на кореновому рівні гальмують засвоєння K і P. З огляду на те, що при вирощуванні об'єктів аквакультури температура води жорстко регламентується технологічними нормами, система аквапоніки буде отримувати воду саме з тою температурою, яка є оптимальною для риб чи ракоподібних. Відповідно при проектуванні інтегрованого комплексу найбільш раціональним рішенням є підбір таких рослин, яким би найбільш підходили наявні температурні межі. Водночас, корекція температури води в межах 2-4°C у потоці, що надходить у комплекс аквапоніки, цілком може бути економічно обґрунтованою.

2. Основні поживні речовини, їх роль і можливі антагонізми. Контроль за живленням рослин у системі аквапоніки має базуватися на основних аспектах, пов'язаних із впливом на поглинання рослинами макро- та мікроелементів. Макроелементи потрібні у відносно великих кількостях, тоді як мікроелементи або мікроелементи потрібні в невеликих кількостях. Крім того, доступність рослині поживних речовин у випадку безґрунтових систем пов'язана з явищами синергії та антагонізму (рис. 2). Зв'язані іони на схемі представляють синергічний або антагоністичні відносини відповідно до напрямку стрілки.

Азот поглинається рослинами для синтезу амінокислот, білків, ферментів і хлорофілу. Найбільш використовуваними формами азоту для удобрення рослин є селітра та амоній. Нітрати швидко засвоюються корінням, активно переміщуються всередині рослин і можуть зберігатися без токсичного впливу. Амоній може засвоюється рослинами лише в невеликих кількостях і не може зберігатися у великих кількостях у тканинах,

оскільки має токсичну дію. Кількості вище 10 мг/л пригнічують рослину. Надлишок азоту зумовлює інтенсивний вегетативний ріст, збільшення циклу дозрівання, формуванню яскраво-зеленого листя, але й низьке зав'язування плодів, високий вміст води в тканинах, низьку лігніфікація тканин і високе накопичення нітратів у тканинах. Як правило, дефіцит азоту проявляється блідо-зеленим забарвленням старих листків (хлороз), прискорюється ріст і старіння.

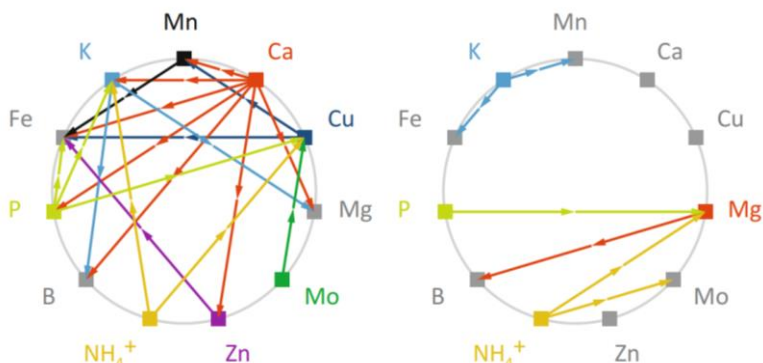


Рис. 2. Синергія та антагонізм поживних речовин між іонами.

Калій (K) є незамінним для поділу та розширення клітин, синтезу білків, активації ферментів і фотосинтезу, а також діє як транспортер інших елементів і вуглеводів через клітинну мембрану. Він також відіграє важливу роль у підтримці осмотичного потенціалу клітини, в рівновазі та регуляції продихових отворів. Перші ознаки дефіциту проявляються у вигляді жовтуватих плям, які дуже швидко некротизуються на краях старих листків. Рослини з дефіцитом калію більш сприйнятливі до різких перепадів температури, стресу і грибкових уражень (Wang et al. 2013).

Фосфор (P) стимулює розвиток коренів, швидкий ріст бруньок і формування квітів. P дуже легко засвоюється і може накопичуватися без шкоди для рослини. Його фундаментальна

роль пов'язана з утворенням високоенергетичної сполуки (АТФ), необхідної для метаболізму рослин. Середня потреба рослин у фосфорі є досить скромними (10–15% потреб N і K). Однак, на відміну від ґрунтового вирощування, P легко вимивається в безґрунтових культурах. Також поглинання P знижується при низьких температурах субстрату (< 13 C) або при підвищенні значень рН (> 6,5), що може призвести до симптомів його дефіциту (Vance et al. 2003). За цих умов підвищення температури та/або зниження рН є значно ефективнішим кроком, ніж додаткові внесення фосфорних добрив. Надлишок P може зменшити або блокувати засвоєння деяких інших поживних речовин (наприклад, K, Cu, Fe) (рис. 2). Дефіцит фосфору проявляється зелено-фіолетовим забарвленням старих листків, які можуть супроводжуватися хлорозом і некрозом на додаток до затримки вегетативного росту верхніх пагонів. Однак ці симптоми є неспецифічними і ускладнюють ідентифікацію дефіциту P (Uchida 2000).

Кальцій (Ca) бере участь у формуванні клітинної стінки, забезпечує проникність мембран, поділ і розширення клітин. Необхідна кількість надає рослині більшу стійкість до грибкових уражень та бактеріальних інфекцій (Liu et al. 2014). Поглинання дуже тісно пов'язаний з потоком води між корінням і надземними частинами. Його засвоєння відбувається через ксилему, тому на процес особливо впливають низькі температури, нестача вологи (посуха або засолення розчину) або надмірна відносна вологість повітря. Оскільки Ca не рухомий в рослині, симптоми проявляються в щойно сформованих частинах рослини (Adams 1991; Adams and Ho 1992; Ho та ін. 1993). Основними симптомами є затримка росту рослин, деформація країв молодих листків, світло-зелене або іноді хлоротичне забарвлення нових тканин і слаборозвинута коренева система без тонких коренів.

Магній (Mg) бере участь у будові молекул хлорофілу. Він іммобілізується при значеннях рН нижче 5,5 і вступає в конкуренцію з поглинання K і Ca (Рис. 2). Симптомами дефіциту є пожовтіння між жилками листя та внутрішній хлороз прикореневих листків. Оскільки Mg можна легко мобілізувати, рослини з дефіцитом магнію спочатку розщеплюють хлорофіл у

старих листках і транспортують Mg до молодшого листа. Тому першою ознакою дефіциту магнію є міжжилковий хлороз у старих листках, на відміну від дефіциту заліза, де міжжилковий хлороз спочатку проявляється на наймолодших листках (Sonneveld і Voogt 2009).

Сірка (S) Сірка потрібна рослинам у кількостях, порівнянних з кількостями фосфору, і для оптимізації її засвоєння цей елемент повинен бути присутнім у співвідношенні 1:10 до азоту (McCutchan et al. 2003). Сірка абсорбується у вигляді сульфату. Нестачу виявити нелегко, оскільки симптоми можна сплутати з симптомами дефіциту азоту, за винятком того, що дефіцит азоту починає проявлятися з старішого листа, тоді як сірки – з наймолодших (Schnug і Haneklaus 2005). Підгодівля рослин S відіграє значну роль у полегшенні пошкоджень фотосинтетичного апарату, спричинених дефіцитом Fe (Muneer та ін. 2014).

Залізо (Fe) Залізо є одним із найважливіших поживних мікроелементів, оскільки воно є ключовим у багатьох біологічних процесах, такі як фотосинтез (Briat et al. 2015; Heuvelink and Kіркельс 2016). Для кращого його засвоєння, рН живильного розчину має бути близько 5,5–6,0, і вміст Mn не повинен бути занадто високим, оскільки ці два елементи згодом вступають у конкуренцію (рис. 4.7). Оптиміальне співвідношення Fe–Mn становить близько 2:1 для більшості рослин (Sonneveld and Voogt 2009). При низьких температурах також знижується ефективність засвоєння. Симптоми дефіциту характеризуються міжжилковим хлорозом від молодих листків до старших, уповільненим розвитком кореневої системи. Симптоми дефіциту не завжди виникають через низький рівень Fe в живильному розчині, але часто вони зумовлені відсутністю доступного Fe для рослини. Використання хелатуючих агентів гарантує постійну доступність Fe для рослина.

Хлор (Cl) Хлор нещодавно вважався мікроелементом, хоча його вміст у рослинах є досить високим (0,2–2,0 % маси). Легко засвоюється рослиною і є дуже мобільний в ньому. Він бере участь у фотосинтетичних процесах і регуляції відкриття продохів. Нестача спостерігається вкрай рідко, супроводжується

типovими симптоми засихання листя, особливо по краях. Набагато частіше відбуваються негативні наслідки через надмірні концентрації, які проявляються у помітному всиханні рослини залежно від індивідуальної чутливості. Щоб уникнути втрат врожаю, необхідно регулярно перевіряти вміст Cl у воді, яка використовується для приготування підживлювальних розчинів. У разі, якщо оборотна вода УЗВ буде характеризуватись сталою тенденцією до зростання концентрацій хлоридів, варто використовувати адаптовані добрива (наприклад, K_2SO_4 , а не KCl).

Натрій (Na) Надлишок натрію шкідливий для рослин, оскільки він токсичний і перешкоджає поглинанню інших іонів. Антагонізм з K не завжди шкідливий, тому що в деяких видах (наприклад, помідори) він покращує смак плодів, тоді як в інших (наприклад, квасолі) може призводити до уповільнення росту. Подібно до Cl, необхідно контролювати концентрацію натрію у воді, яка використовується для приготування підживлюючого розчину (Sonneveld and Voogt 2009).

Марганець (Mn) входить до складу багатьох коферментів і бере участь у рості клітин кореня, підвищує їх стійкість до патогенів. Його наявність контролюється рН поживного розчину та конкуренцією з іншими поживними речовинами (рис. 2). Симптоми дефіциту подібні до симптомів Fe, за винятком появи злегка заглиблених ділянок між прожилками листової пластини (Uchida 2000). Компенсування дефіциту може бути здійснено додаванням $MnSO_4$ або зниженням рН поживного розчину.

Бор (B) відіграє ключову роль у зав'язуванні плодів та розвитку насіння. Механізм засвоєння аналогічний з Ca, з якими він може конкурувати. Рівень рН поживного розчину має бути нижче 6,0, а оптимальний діапазон становить між 4,5 і 5,5. У нових структурах можна виявити симптоми дефіциту які проявляються у темно-зеленому кольорі листової пластини, молоде листя значно збільшує свою товщину і має шкірясту консистенція. Згодом на них може проявлятися хлоротичне, а потім некротичне з іржавим забарвлення.

Цинк (Zn) відіграє важливу роль у деяких ферментативних реакціях. На ефективність його поглинання сильно впливають рН

і запас Р у поживному розчині. Значення рН між 5,5 і 6,5 сприяє доброму засвоєнню Zn. Низька температура і високий рН знижують кількість цинку, що поглинається рослиною. Виникає дефіцит цинку рідко і проявляється переважно хлорозними плямами в міжжилкових ділянках листя, дуже короткими міжвузлями, уповільненим ростом. (Gibson 2007).

Мідь (Cu) бере участь у дихальних і фотосинтетичних процесах. Її поглинання знижується при значеннях рН вище 6,5, тоді як при значеннях рН нижче 5,5 може призвести до токсичних ефектів (Rooney et al. 2006). Високий рівень амонію та фосфор взаємодіє з Cu, знижуючи доступність останньої. Надмірна присутність Cu перешкоджає засвоєнню Fe, Mn і Mo. Нестача проявляється міжжилковим хлорозом, який призводить до розпаду тканин листя, що виглядають як висушені (Gibson 2007).

Молибден (Mo) Молибден важливий для синтезу білка та метаболізму азоту. На відміну від інших мікроелементів, він краще доступний при нейтральному значенні рН. Симптоми дефіциту починаються з хлорозу та некрозу вздовж головного ребра старого листя, тоді як молоде листя виглядає деформованим (Gibson 2007).

3. Коригування вмісту поживних речовинам відповідно до вимог рослин. З моменту розробки систем безгрунтового садівництва в 1970-х роках (Verwer 1978; Cooper 1979), були розроблені та скориговані різні поживні розчини відповідно до вподобань та потреб виробників (Таблиця 1; De Kreij et al. 1999). Всі суміші забезпечують надлишкову доступність всіх елементів, щоб запобігти дефіциту та забезпечити баланс між (двовалентними) катіонами з метою уникнення конкуренції між катіонами. Різні види рослин мають достатньо відмінні вимоги та потреби, що пов'язано як з відмінностями плодкових культур і зелені, так і з індивідуальними особливостями на різних етапах росту культури. Наприклад, томати мають вищі показники поглинання N, P, Ca та Mg і порівняно низьку потребу калію на ранніх (вегетативних) стадіях. Як тільки рослини почнуть утворювати плоди, вегетативний ріст уповільнюється, а потреба в Ca та K зростає. Проблема корекції також посилюється у зв'язку з очікуваними коливаннями надходжень поживних речовин від

системи аквакультури внаслідок зміни обсягів годівлі на різних етапах вирощування риби. Також слід відзначити окремі цінні елементи, які можуть виступати як лімітуючі. Наприклад, фосфор (P) є важливою, але вичерпною копалиною, яка видобувається для виробництва добрив, але світові запаси наразі вичерпуються з тривожною швидкістю. Використання біореакторів у роз'єднаних системах аквапоніки дозволяє завдяки мікрофлорі перетворювати органічний фосфор рибницьких відходів на ортофосфати, які добре засвоюються рослинами (Goddek et al. 2016, 2018).

Для забезпечення високого коефіцієнту рециркуляції хімічний склад повинен бути добре відомий та періодично контролюватися, - це дозволить уникнути дисбалансу в надходженні поживних речовин, але також попередити накопичення окремих токсичних елементів/сполук. Детальний огляд вимог до якості води для системи гідропоніки було проведено Де Крей та ін. (1999).

Аналіз необхідно розпочинати з параметрів води, яка використовується як підживлювальна в РАС. Після цього проаналізувати, які сполуки чи елементи будуть надходити у систему внаслідок життєдіяльності риби, а які видалятимуться чи трансформуються у процесах попереднього очищення, аерації, корекції фізико-хімічних параметрів. Зрушення рН мають бути компенсовані шляхом використання кислот або лугів, при цьому варто провести аналіз який саме реагент буде більш доцільним у даній системі.

Тема 8. Порівняльна характеристика сучасних систем гідропоніки

1. Принципи організації сучасних систем гідропоніки

2. Класифікація гідропонних систем за принципом розподілу поживних речовин та гідравлічними умовами

1. Сучасні системи, призначені для вирощування рослинницької продукції, можна розділяють на відкриті, де відведений від рослин поживних розчин не переробляється, і закриті системи, де відведений від коренів потік поживних речовин збирається та повертається назад до системи (рис. 1). У цих відкритих системах витрачена та/або надлишкова поживна речовина з потоком води надходить у ґрунт або поверхневі водойми, також може бути використана як рідке добриво для відкритого ґрунту. Однак, з точки зору економіки та екологічних проблем, безґрунтові системи мають бути максимально закритими, тобто з рециркуляцією поживних речовин. Рішення виникає там, де субстрат використовується повторно, і де використовуються більш стійкі матеріали. Зараз системи безґрунтового вирощування поширені в практиці садівництва країн Європи, хоча не в кожній країні це відбувається у великих масштабах.

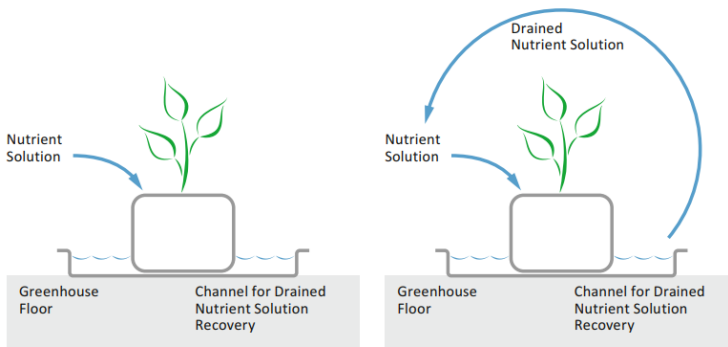


Рис. 1. Схема відкритої та закритої системи гідропоніки.

У комерційних системах проблеми розповсюдження патогенів вирішуються знезараженням води за допомогою методів фізико-хімічних та хімічних методів. Однак, одним з головних факторів, які перешкоджають ефективному використанню рециркуляційних поживних речовин, є процес накопичення солей. Особливо – хлориду натрію, який міститься у кормах для риб. Тому в окремих випадках пропонується застосовувати технології опріснення оборотної води як альтернативу її розбавленню.

Безґрунтові системи вирощування еволюціонували як одне з можливих рішень, щоб уникнути перенесення з ґрунту хвороб, які завжди були проблемою в галузі тепличного вирощування. Переваги безґрунтових систем порівняно з ґрунтовими культурами:

- Початок без патогенів із використанням субстратів, відмінних від ґрунту, та/або ефективного контролю за патогенами, що передаються через ґрунт.
- Ріст і врожайність не залежать від типу ґрунту/якості оброблюваної території.
- Кращий контроль росту завдяки цілеспрямованому забезпеченню поживним розчином.
- Можливість повторного використання поживного розчину, що дозволяє максимально ефективно використати ресурси.
- Підвищення якості продукції завдяки кращому контролю за параметрами вирощування (температура, відносна вологість) і шкідники.

Проблемні аспекти

Переваги



Рис. 2. Порівняльна характеристика закритих систем гідропоніки.

Найважливіший загальний принцип, пов'язаний з гідропонікою, полягає в тому, щоб використовувати енергію поживних речовин якомога ефективніше для досягнення оптимізованого виробництва як риби, так і рослин. Цей самий аргумент також можна застосувати до споживання води. Гідропонічною системою, про яку йдеться. Вода має бути використана максимально ефективно з тим, щоб знизити витрати енергії на її обробку та мінімізувати вплив на навколишнє середовище.

Таблиця 1. Класифікація систем гідропоніки за основними характеристиками

Характеристика	Категорія	Приклади
Безґрунтова система	Без субстрату	NFT (технологія поживної плівки)
		DFT (технологія глибокого потоку)
		Аеропоніка
	З субстратом	Органічний субстрат (торф, кокосове волокно, кора, деревне волокно, тощо)
		Мінеральний субстрат (кам'яна вата, пемза, пісок, перліт, вермикуліт, керамзит)
		Синтетичний субстрат (поліуретан, полістирол)
Відкрита/закрита системи	Відкриті або прямоточні системи	Рослини постійно підживлюють «свіжим» розчином без відновлення розчину, злитого з модулів культивування
	Закриті або рециркульовані системи	Злитий поживний розчин переробляють і доливають з нестачею поживних речовин до потрібного рівня
Водопостачання	Безперервне	NFT (технологія поживної плівки) DFT (технологія глибокого потоку)
	Періодичне	Періодичне крапельне зрошення, припливи та відпливи, аеропоніка

2. Класифікація гідропонних систем за принципом розподілу поживних речовин та гідравлічними умовами.

Техніка глибокого потоку (DFT). Техніка глибокого потоку, також відома як глибоководна техніка, передбачає культивування рослин на плаваючих або висячих опорах (плотах, панелях, дошках) у заповнених контейнерах з робочою висотою шару води 10–30 см. Однією з найпростіших систем є резервуари глибиною 20–30 см, які можуть бути виготовлені з різних матеріалів і гідроізолюються поліетиленовими плівками. Такі резервуари оснащені плавучими палетами (типові розміри та конфігурація залежить від асортименту виробників), які служать для підтримки рослин над водою, у той час як коріння рослин проникають у воду води. Система особливо цікава, оскільки мінімізує витрати та управління.

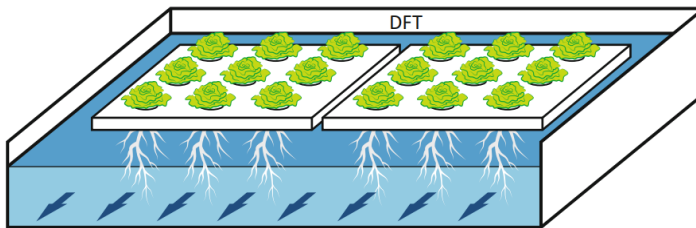


Рис. 3 Ілюстрація системи DFT із плаваючими панелями

Така технологія найкраще підходить для короткотривалих швидкозростаючих культур, таких як салат, де відносно великий об'єм розчину сприяє поповненню поживних речовин розчину лише в кінці кожного циклу. Характеризуються потребою у контролі розчиненого кисню. Рівень кисню повинен бути вище 4–5 мг/л інакше може виникнути дефіцит поживних речовин через низьку продуктивність кореневої системи. Проблема вирішується переважно за рахунок надходження кисню із новими порціями води або завдяки системі Вентурі (рекомендовано при температурі води вище 23°C).

Техніка поживної плівки (NFT). Техніка NFT використовується достатньо широко, і її можна вважати класичною гідропонною системою культивування, де поживний

розчин тече вздовж і циркулює в жолобах з шаром води 1–2 см. Рециркуляція живильного розчину і відсутність субстрату є однією з головних переваг системи NFT. Додатковою перевагою є його великий потенціал для автоматизації, що призводить до економії витрат на оплату праці (посадка та збирання врожаю) і можливість керувати оптимальною густиною рослин під час посіву кожного наступного циклу. З іншого боку, відсутність субстрату та низький рівень води робить NFT вразливою до виходу з ладу насосів, наприклад через засмічення або збій в електроживленні. Перепади температури живильного розчину можуть викликати у рослин стрес а потім хвороби.

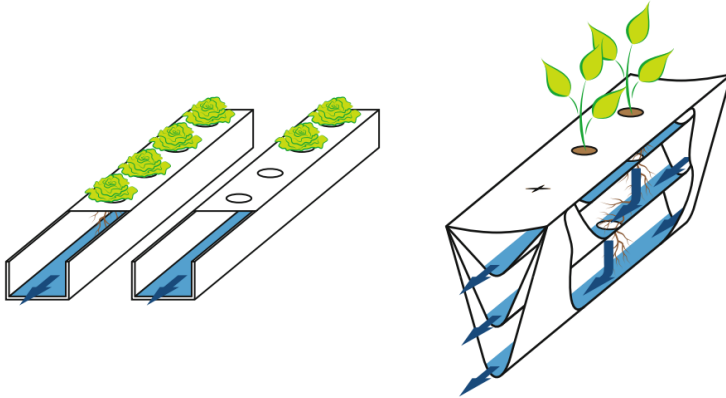


Рис. 4. Ілюстрація системи NFT (ліворуч) і багатошарового жолоба NFT, розробленого та проданого компанією «Нові системи вирощування» (NGS), Іспанія (праворуч)

Розвиток кореневої системи, частина якої залишається підвищеною в повітрі вище потоку поживних речовин і яка піддається ранньому старінню та втраті функціональності, є основним обмеженням такої технології, оскільки перешкоджає вирощуванню культур із тривалим циклом (понад 4–5 місяців). Через високу стійкість до коливань температури, ця система не підходить для середовищ культивування, що характеризуються високими рівнем радіації та температурою (наприклад, південні райони Середземномор'я басейн). Однак у відповідь на ці

виклики було створено багатошаровий жолоб NFT, що забезпечує довший виробничий цикл без проблем із засміченням (NGS). Він складається з серії взаємопов'язаних шарів, розташованих каскадом, так що навіть для видів рослин, що міцно вкорінюються (наприклад помідори), поживний розчин все одно знайде свій шлях до коріння, минаючи забитий корінням шар через нижні шари.

Аеропонічні системи. Техніка аеропоніки в основному спрямована на порівняно невеликі за розмірами види, але не має широкого розповсюдження через потребу у високих інвестиціях та витрати на управління. Рослини підтримується пластиковими панелями або полістиролом, розташовується горизонтально або під нахилом верхівки ящиків для вирощування. Ці панелі підтримуються конструкцією, виготовленою з інертного матеріалу (пластик, сталь, покрита поліетиленовою плівкою, пінополістирольні плити), який формує закриті ящики (бокси), де може розвиватися підвішена коренева система (рис. 5). Поживний розчин розбризкують безпосередньо на коріння за допомогою статичних спринклерів (розпилювачами), вставленими на труби, розташовані всередині коробки.

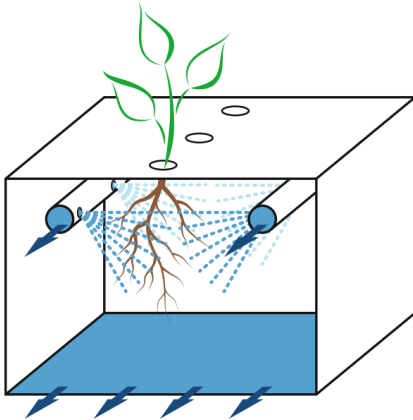


Рис. 5. Ілюстрація техніки аеропонного модуля.

Тривалість розпилення може коливатись від 30 до 60 секунд, при цьому частота варіюється в залежності від терміну вирощування, стадії росту рослин, вид і час вирощування день. У деяких системах використовуються вібраційні пластини для створення мікрокрапель води, які у формі пари конденсуються на коренях. Фільтрат збирається на дні модулів та транспортується до резервуару для повторного використання.

Тема 9. Характеристики субстратів та особливості використання їх у системах гідропоніки

- 1. Види субстратів, що використовуються у гідропоніці.**
- 2. Основні характеристики, що впливають на можливість використання у інтегрованій аквакультури.**
- 3. Порівняльний аналіз найбільш популярних субстратів у гідропоніці.**

1. Дослідження ефективності використання різних субстратів було розпочато ще у 70-х роках минулого століття. Багато негативних результатів було отримано саме через те, що серед їх характеристик були надмірна вологість або сухість, нестабільність, висока вартість, виділення у воду токсичних речовин. Водночас, окремі субстрати успішно себе зарекомендували: мінеральна вата, перліт, кора, койра, торф, поліуретан та пінопласт. Сучасна класифікація субстратів розділяє їх за механічними властивостями (сипучі та волокнисті), походженням (органічні, мінеральні, синтетичні).

Волокнисті субстрати представлені як органічними (торф, солома, кокосове волокно), так і мінеральними (кам'яна вата). Волокна різної крупності та структури надають субстратам високу водоутримуючу здатність (60–80%) та порівняно низьку повітроємність (пористість). Такі характеристики дозволяють мінімізувати питому потребу у субстраті на рослину, оскільки коренева система забезпечується достатньою кількістю вологи.

Серед гранульованих субстратів переважають неорганічні (наприклад, пісок, пемза, перліт, керамзит), вони характеризуються різними розмірами частинок і, отже, текстурою; вони мають високу пористість і вільно дрениуються. Водоутримувальна здатність їх досить низька (10–40%), і значна частина утриманої води не є легкодоступною для рослини. Тому необхідний об'єм субстрату на одну рослину вище ніж у волокнистих. Також у зернистих субстратах спостерігається помітний градієнт вологи вздовж профілю, і це спричиняє розвиток коренів переважно на дні контейнера. Субстрати зазвичай поміщають у пластикову тару (пакети для

вирощування або плити) або в інші типи контейнерів різних розмірів із синтетичних матеріалів.

У природних умовах субстрат використовується для закріплення коренів, в якості опори для рослини та як провідник водно-поживного середовища. Рослини, вирощені в безґрунтових системах, характеризуються незбалансованим співвідношенням пагін/коріння, їх потреби у воді та поживних речовинах набагато вищі, ніж у рослини на відкритому ґрунті. Щоб задовольнити ці вимоги, необхідно використовувати субстрати, які, окремо або в суміші, забезпечують оптимальні та стабільні хіміко-фізичні та харчові умови. Попри те, що асортимент доступних матеріалів є достатньо широким, поки що не існує єдиного субстрату, який можна було б універсально використовувати для всіх культур.

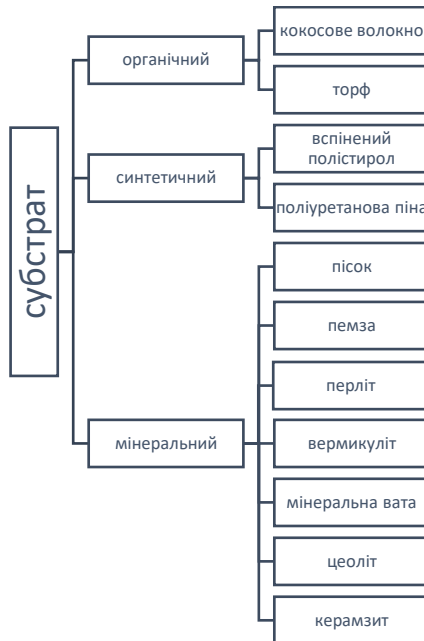


Рис. 1. Класифікація субстратів гідропоніки.

2. Різні види субстратів суттєво відрізняються за фізико-механічними властивостями, окрім того – різні види рослин також характеризуються доволі відмінними межами оптимумів щодо властивостей субстратів. Однією з найбільш важливих характеристик є насипна щільність, яка виражається сухою вагою субстрату на одиницю об'єму. Ця характеристика відображає можливість утримання стебла рослини за рахунок закріплення кореневою системою. Вважається, що оптимальні значення густини коливаються в межах від 150 до 500 кг/м³. Такі субстрати, як перліт (приблизно 100 кг/м³), полістирол в гранулах (прибл. 35 кг м³), сфагновий торф (близько 60 кг м³) не підходять як однорідний матеріал для використання з вертикально ростучими рослинами.

Пористість. Ідеальний субстрат для горщикових культур повинен мати пористість не менше 75% зі відсотком співвідношення макропор (15–35%) і мікропор (40–60%) залежно від культивованого виду та умов навколишнього середовища. У малогабаритних контейнерах загальна пористість може досягати 85% об'єму. При цьому важливо, щоб структура субстрату залишалась незмінною протягом тривалого часу, матеріал не мав схильності до зменшення об'єму та ущільнення під час фази зневоднення.

Водоутримувальна здатність забезпечує достатній рівень вологості субстрату для культур без необхідності частого зрошення. Однак, водоутримувальна здатність не повинна бути надто високою, щоб уникнути асфіксії коренів і занадто сильного охолодження. Також необхідно враховувати, що при постійному збільшенні кореневої системи біомаси під час росту вільна пористість у субстраті поступово зменшується і змінюються гідрологічні характеристики субстрату.

Хімічна стійкість. Попри те, що субстрати можуть володіти певним запасом поживних речовин, які можуть поступово у процесі розчинення/вимивання надходити у воду, перевагу рекомендується надавати хімічно інертному матеріалу. У такому разі необхідні елементи живлення для культури рослин вводять з підживлюючими розчинами. Таким чином, досягається ефективний контроль вмісту елементів у системі,

попереджується потенційний дефіцит, оскільки кількість поживних речовин у неінертному субстраті буде поступово зменшуватись аж до повного зникнення. Додатковою перевагою інертного субстрату є можливість його багаторазового використання.

Механічна стійкість. Іншою важливою характеристикою субстрату є його механічна стійкість. Вона регламентує термін служби субстрату, дозволяє створювати незмінні умови для вирощування багатьох наступних поколінь рослин. Бажано також, щоб такі субстрати виготовлялись з матеріалів, що мають низький екологічний слід. Тому, з одного боку субстрат може бути міцним, стійким до механічної дії та хімічно інертним, що дозволить його багаторазове використання протягом багатьох років. Але, на противагу, також існує альтернатива використання субстрату з коротким терміном служби (одноразовим), який можна легко утилізувати без шкоди навколишньому середовищу. Разом з таким субстратом досить часто проходять мінералізацію і залишки органічних речовин, що були затримані на його поверхні. Традиційні рішення у гідропоніці передбачають використання доступних органічних субстратів, досить часто – місцевого походження, які становлять побічну продукцію переробки. Тому необхідно враховувати, що органічні субстрати можуть бути схильні до підвищеної швидкості розкладання, викликаючи ущільнення субстрату та проблеми з аерацією коренів. Тому такі матеріали можуть бути використані для культури з коротким циклом росту.

Вартість. Вартість субстрату є непрямим технологічним показником, але одним з тих важливих чинників, які визначають економічну ефективність інтегрованого комплексу. Тому субстрат повинен бути недорогим або принаймні економічно ефективним, легко доступним та стандартизованим з хіміко-фізичної точки зору.

3. Відмінності між властивостями окремих видів субстратів дозволяють зробити аналіз щодо перспектив для застосування у різних умовах та відносно різних культур. Оскільки відповідність вимогам рослин того чи іншого субстрату буде визначати успіх вирощування рослинницької продукції, вибір має бути

обґрунтований не тільки доступністю у регіоні чи привабливою ціною, але й на ефективністю підтримки балансу у інтегрованій аквасистемі. Відповідно до класифікації, властивості субстратів варто розглянути у контексті їх природи походження (органічні, мінеральні, синтетичні).

Органічні субстрати.

Торф. Торф, який використовується окремо або з іншими субстратами, в даний час є найважливішим матеріалом органічного походження для підготовки субстрату. Термін «торф» охоплює природні копалини, що походять із залишків мохоподібних (*Sphagnum*), *Cyperaceae* (*Trichophorum*, *Eriophorum*, *Carex*) та інші (*Calluna*, *Phragmites* та ін.), трансформованих в анаеробних умовах. Залежно від умов формування, властивості торфу можуть суттєво відрізнятись. У верхових болотах переважає розкладений шар темного кольору (бурий торф) і слабозрозкладений, мілкіший шар світлого кольору (білий торф). Обидва торфи характеризуються доброю структурною стабільністю, порівняно низькою доступністю поживних речовин і низьким показником рН. Різниця у структурі є пояснює різні показники водотримуючої здатності, розміри пор. Коричневий торф з дуже дрібними порами має більшу водоутримуючу здатність і меншу вільну пористість. Характеристики торфів сильно змінюються залежно від розміру частинок, але водопоглинання може перевищувати від 4 до 15 разів власну вагу. Верхові болота зазвичай задовольняють вимогам необхідні для хорошого субстрату. Крім того, вони мають постійні та однорідні властивості, тому їх можна промислово використовувати. Проте, застосування такого торфу потребує корекції рН (наприклад, за допомогою карбонату кальцію (CaCO_3)). Як правило, для сфагнового торфу з рН 3-4, для зниження рН на кожен одиницю необхідно додати $2 \text{ kg/m}^3 \text{ CaCO}_3$. Слід також враховувати, що торф піддається мікробіологічним процесам розкладання, які з часом можуть збільшити водоутримувальну здатність і зменшити вільну пористість.

Кокосове волокно (койра) отримують шляхом видалення волокнистої частини з лушпиння кокосових горіхів. Койра є побічним продуктом виробництва кокосової олії і промисловості

з видобутку волокна, складається майже виключно з лігніну. Перед використанням його компостують 2–3 роки, а потім його зневоднюють і пресують. Перед застосуванням у гідропоніці койру необхідно регідратувати шляхом додавання води в обсягах 2–4 стиснених об'ємів субстрату. Кокосове волокно має хіміко-фізичні характеристики, подібні до світлого торфу, але з перевагою є вище значення рН. Койра також має менш шкідливий вплив на навколишнє середовище, ніж торф (надмірна експлуатація торф'яних боліт) або мінеральна вата, де є виникають проблеми з утилізацією.

Підкладки на основі дерева. Органічні субстрати, отримані з деревини або її побічних продуктів, таких як кора, деревна стружка або тирса також використовуються в глобальному комерційному рослинництві. Субстрати на основі цих матеріалів зазвичай мають хороший вміст повітря і високу гідравлічну провідність. До недоліків можна віднести низьку здатність утримувати воду, недостатню аерацію, викликану мікробною активністю, невідповідний розподіл частинок за розміром, іммобілізацію поживних речовин або негативні ефекти через скупчення солі та токсичних сполук.

Мінеральні субстрати. До цієї категорії входять природні матеріали (наприклад, пісок, пемза) і мінеральні продукти отримані в результаті промислових процесів (керамзит, вермикуліт, перліт).

Пісок. Піски - природний неорганічний матеріал з частинками від 0,05 до 2,0 мм діаметром, що походить від вивітрювання різних мінералів. Склад пісків може змінюватися залежно від походження, але в цілому він складається на 98,0–99,5% кремнезему (SiO₂). рН в основному пов'язаний з вмістом карбонатів. Піски з меншим вмістом карбонату кальцію та рН 6,4–7,0 краще підходять як матеріал субстрату, оскільки вони не впливають на розчинність фосфору і деяких мікроелементів (наприклад, заліза та марганцю). Як і всі субстрати мінерального походження, пісок має низьку буферну здатність. Пісок (0,05–0,5 мм) найбільш придатний для використання в гідропонних системах у сумішах 10–30% за об'ємом з органічними

матеріалами. Можна використовувати крупнозернистий пісок (>0,5 мм) щоб збільшити дренажну здатність субстрату.

Пемза. Пемза містить силікат алюмінію вулканічного походження, дуже легка і пориста, може містити невелику кількість натрію та калію та сліди кальцію, магній і залізо залежно від місця походження. Здатна утримувати кальцій, магній, калій і фосфор з поживних розчинів і поступово вивільняти їх назад. Зазвичай має нейтральний рН, але деякі матеріали можуть мати надмірно високий рН, хорошу вільну пористість, але низьку здатність утримувати воду. Проте, структура має тенденцію до швидкого руйнування через легке розщеплення частинок. Пемза, додана в торф, підвищує дренаж і аерацію субстрату. Для використання в садівництві частинки пемзи розміром від 2 до 10 мм діаметром.

Вулканічні туфи. Туфи утворюються в результаті вулканічних вивержень із розміром частинок від 2 до 10 мм діаметром. Вони можуть мати насипну щільність від 850 до 1100 кг/м³ і здатність утримувати воду від 15% до 25% за об'ємом.

Вермикуліт. Вермикуліт містить водні філосилікати магнію, алюмінію та заліза, які в природному стані мають тонку пластинчасту структуру, здатну утримувати дрібні краплі води. Спінений вермикуліт широко використовується в садівництві та характеризується високою буферною здатністю. Структура вермикуліту не дуже стійка, оскільки він має низький опір стисканню і має тенденцію до зменшення внаслідок руйнування гранул. Його можна використовувати окремо; однак краще змішувати його з перлітом або з торфом.

Перліт. Перліт містить силікат алюмінію вулканічного походження, що складає 75% SiO₂ і 13% Al₂O₃. Сировину подрібнюють, просівають, пресують і нагрівають до 700–1000°C. При цих температурах вода, що міститься в сировині, перетворюється на пару шляхом розширення частинок у дрібні білувато-сірі агрегати, які, на відміну від вермикуліту, мають закрити комірчасту структуру. Він дуже легкий і володіє високою вільною пористістю навіть після замочування. Він не містить поживних речовин і є практично нейтральним. Однак, рН може змінюватися легко, тому що буферна ємність перліту незначна.

Закрита коміркова структура дозволяє утримувати воду лише на поверхні та в проміжках між агломераціями, тому водоутримувальна здатність є змінною і залежить від розмірів агломерацій. Найбільш придатними для садівництва є діаметр 2–5 мм. У суміші з органічними матеріалами підвищує м'якість, проникність і аерацію субстрату. Перліт можна повторно використовувати протягом кількох років.

Керамзит. Керамзит отримують обробкою глиняного порошку приблизно при 700°C. Утворюються стійкі агрегати, які залежно від використовуваного глинистого матеріалу мають змінну рН і насипну щільність. Керамзит можна використовувати в суміші з органічними матеріалами в кількості близько 10-35% за об'ємом, що забезпечує більшу аерацію та дренаж. Керамзит зі значеннями рН вище 7,0 не підходить для використання в безгрунтових системах.

Кам'яна вата. Кам'яна вата є найбільш використовуваним субстратом для безгрунтового вирощування. Вона утворюється шляхом плавлення силікатів алюмінію, кальцію і магнію і вуглецевого коксу при температурі 1500–2000°C. Зріджену суміш екструдують у вигляді ниток діаметром 0,05 мм і, після стиснення та додавання спеціальних смол, матеріал отримує дуже міцну й легку волокнисту структуру з високою пористістю. Кам'яна вата хімічно інертна і при додаванні в основу покращує її аерацію та дренаж, а також забезпечує чудове кріплення для коренів рослин. Використовується окремо, як посівний субстрат і для безгрунтового вирощування. Плити, що використовуються для культивування, можуть бути використані протягом кількох виробничих циклів, якщо структура здатна гарантувати достатню пористість і доступність кисню для кореневих систем. Зазвичай, після кількох циклів врожаю, більша частина пористості субстрату заповнена старими, мертвими корінням, і це призводить до поступового ущільнення субстрату.

Цеоліти. Цеоліти містять гідратовані силікати алюмінію, що характеризуються здатністю до поглинати газоподібних елементів, вони багаті макро- і мікроелементами, мають високу абсорбуючу здатність і високу внутрішню поверхню (структури пори близько 0,5 мм).

Синтетичні матеріали. Синтетичні матеріали

включають як пластичні матеріали низької щільності, так і іонообмінні синтетичні смоли. Ці матеріали називаються «спіненими», тому що вони отримані у процесі розширення при високих температурах. Ще не здобули широкого застосування, але вони мають фізичні властивості, які здатні для збалансування характеристик інших субстратів.

Пінополістирол. Пінополістирол випускається в гранулах діаметром 4-10 мм із закритою структурою гранули. Він не розкладається, дуже легкий і має дуже високу пористість, але з надзвичайно низькою водоутримуючою здатністю. Також має практично нульову буферну здатність, тому його додають виключно в субстрат (наприклад, торф) щоб покращити його пористість і дренаж. Бажаний розмір частинок становить 4–5 мм.

Пінополіуретан. Пінополіуретан - матеріал низької щільності (12-18 кг/м³) з пористою структурою, що дозволяє поглинати воду рівну 70% свого об'єму. Він хімічно інертний, має майже нейтральний рН (6,5–7,0), не містить корисних поживних речовин, доступних рослинам і не піддається розкладанню (Kipp et al. 2001). Пропонується у формі гранул, кубиків або блоків. Як і кам'яна вата, він також може використовувати для безгрунтового вирощування.

Тема 10. Підтримка балансу системи «рибницький басейн-аквапоніка» на рівні складу поживних елементів та фізико-хімічних показників

- 1. Балансування вмісту кисню у воді**
- 2. Балансування рН**
- 3. Прогноз живлення системи та управління**

1. Концентрація розчиненого у воді кисню відіграє ключову роль в риборівництві попри те, що серед об'єктів аквакультури є види риб, які дихають атмосферним повітрям (кларієвий сом). Вміст кисню у воді лімітує не тільки процеси життєдіяльності риб, що відображається на темпах росту та ефективності використання кормів, а й на перебігу процесів біологічного очищення. Коренева система рослин гідропоніки також позитивно реагує на належний вміст кисню у воді, адже знижується ризик загнивання кореневої системи, покращується дихання рослини у темний період доби. Таким чином, потреба у зниженні концентрації кисню до максимально можливих значень виникає у спорудах із зброджування твердих риборицьких відходів. Фактично, ці споруди або являють відокремлений контур, який повертає у гідропонну систему лише мінералізовану та дегазовану воду, або як прямооточну систему, з якої мінералізований мул виводиться для використання в якості добрив для відкритого ґрунту. Оскільки за нормальних умов максимальне насичення води киснем не становить загрози ані в риборицьких басейнах, ані у спорудах біологічного очищення, споруди з аерації у цих блоках працюють без обмежень щодо потужності. Залишкових концентрацій кисню у воді, що надходить у гідропонну систему, цілком вистачає для нормального функціонування системи. Проте, перенасичення види киснем буде супроводжуватись витісненням розчиненої вуглекислоти, що може негативно відобразитися на життєдіяльності зануреної частини рослин. Тому єдиним завданням щодо кисневого режиму залишається лише видалення надлишку кисню перед подачею води/малу у споруди біологічного очищення з анаеробним режимом.

Оскільки зростання щільності посадки призводить до стрімкого збільшення швидкості споживання кисню (навіть у басейнах з рибами, що дихають атмосферним киснем), виникає потенційна загроза для стабільності водного середовища, як в межах басейнів, так і в очисних спорудах (рис. 1). Тому для успішного культивування риб та стабільного росту рослин у інтегрованому комплексі передбачають встановлення потужних систем аерації. Ця практика пов'язана також із критичною важливістю для блока аквакультури протікання у спорудах біологічного очищення процесів нітрифікації (рівень токсичності первинного метаболіта риб – амміаку/амонійного нітрогену на порядок вищий, ніж рівень токсичності нітратів, а нітрати вважаються більш доступною формою для рослин, ніж амонійний нітроген). Окрім того, підвищення щільності посадки фактично передбачає і збільшення обсягів годівлі на одиницю об'єму, що також відобразиться на абсолютних значеннях навантаження на систему за амонійним нітрогеном.

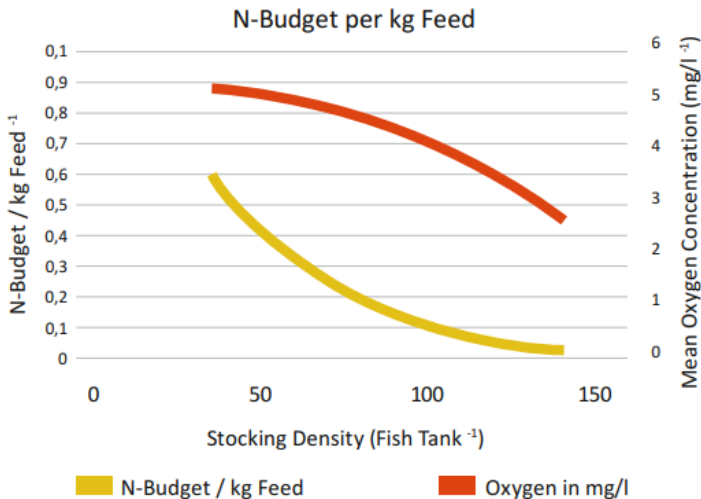


Рис. 1. N-бюджет на кг корму та рівень кисню в аквакультурі африканського сома при різних щільностях посадки (вихідні дані)

2. Одним із найбільш важливих параметрів водного середовища, який характеризується суттєвими коливаннями внаслідок фізико-хімічних процесів, та потребує постійного контролю у обох блоках інтегрованої аквасистеми, є водневий показник. Він дає можливість наочно продемонструвати як залежить ефективність вирощування обох об'єктів культивування від його значення. Окрім того, значення рН також впливає на перебіг процесів біологічного очищення води як у аеробних, так і у анаеробних умовах. А оскільки рН фактично відображає певний хімічний баланс у водному середовищі, змінювати його у кожному блоці інтегрованого комплексу відповідно до потреб об'єктів культивування чи мікробіоти очисних споруд виявляється не так просто. Традиційно вважають, що для рослин, що культивуються у гідропоніці, оптимальні межі рН становлять від 4,5 до 6,0. Водночас, для більшості об'єктів РАС рН рекомендується підтримувати у діапазоні між 7,0 та 8,0. Такі межі є оптимальними не тільки для більшості риб, а й для мікрофлори біологічних очисних споруд, де в аеробних умовах має відбутися критично важлива для РАС трансформація амонійного нітрогену у нітрати. Очевидно, що у спільному контурі буде важко досягнути компромісу для обох блоків. як наслідок – зниження ефективності виробництва (темів росту, питомого приросту на одиницю внесеного корму), додаткові ризики щодо захворювань, перевитрата ресурсів.

Для рослин потреба у визначеному діапазоні рН пов'язана перш за все з доступністю макро- та мікроелементів. Тому для системи гідропоніки, де кількість мікрофлори є мінімальною, такий діапазон необхідно контролювати дуже жорстко. Межі аквапоніки дозволяють задовільнити потреби аквакультури за умови мінімальних ризиків для рослин, які пов'язані із зниженням доступності заліза та частково марганцю (Рис. 2). Водночас, суттєвою перевагою є те, що за значення рН близько 7 максимально доступним залишається фосфор, який складає вагомому частку у метаболітах риб та має тенденцію до накопичення у замкнутому контурі. Але якщо врахувати, що процес нітрифікації найефективніше відбувається при значенні рН близько 7,5, стає очевидним, що без додаткових кроків щодо

корекції водневого показника перед окремими блоками неможливо досягнути одночасно максимально ефективної роботи усіх блоків інтегрованого комплексу.

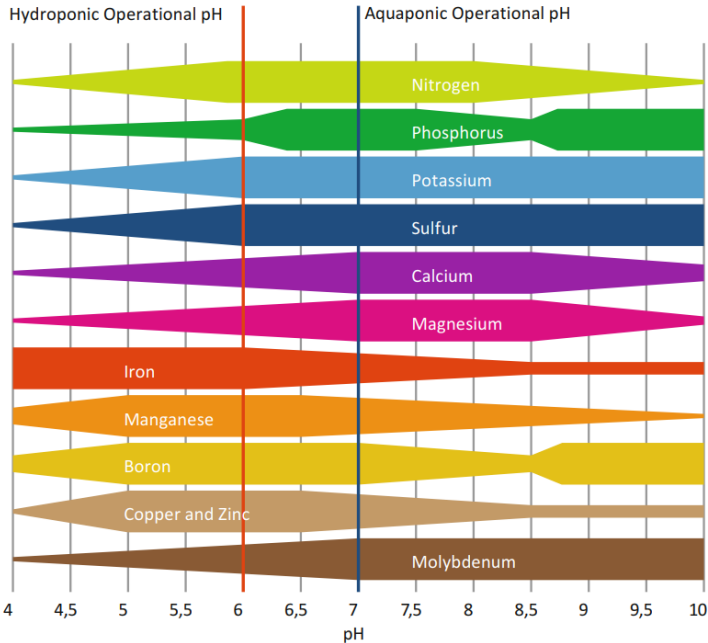


Рис. 2. Приклад стандартної діаграми доступності поживних речовин для культивованих рослин, пов'язаної з рН.

Очевидно що більш ефективною виявиться корекція рН у роз'єднаних системах з декількома петлями. У переважній більшості для зрушення рН у необхідний бік використовують луги або кислоти, вибір того чи іншого реагенту ґрунтується на потенційній потребі або потенційній шкоді йонів, які надійдуть у водне середовище внаслідок введення реагенту. Наприклад, КОН у порівнянні з NaOH є більш раціональним вибором для підлизування, оскільки надлишок натрію є шкідливим для обох блоків системи, тоді як калій виконує важливу роль у живленні рослин.

3. Прогноз живлення системи та управління. Різні щільності посадки риб у РАС та відмінності у програмах годівлі суттєво впливають на обсяги потенційно цінних для рослин сполук, що надходять з водою від рибницьких басейнів. Придатність технологічної води аквакультури для рослин визначається також і станом розчинених домішок, адже органічні речовини за традиційними уявленнями практично не засвоюються рослинами. При цьому сучасні умови безгрунтового вирощування не дозволяють сподіватись на те, що в межах прикореневої зони рослин будуть утворюватися потужні агломерації з симбіотичної мікрофлори. У такому випадку утворення доступних рослинам сполук буде залежати від ефективності споруд біологічного очищення РАС (нітрифікація, окиснення).

Максимально можливе надходження поживних речовин можна уявити як різницю між обсягами згодованих кормів та засвоєними рибами компонентами. Продукція метаболізму риб на незасвоєні часточки корму (неперетравлені компоненти, пилоподібна фракція) фактично і є той потенціал, на який може розраховувати блок гідропоніки.

В силу об'єктивних чинників рослинницький комплекс не може регламентувати умови для вирощування та які саме види мають зростати в аквакультурі. У даному аспекті первинними є технологічна доцільність та економічне обґрунтування виробництва продукції аквакультури. Сучасна аквакультура Європи має достатньо обмежений перелік видів, які вирощують в РАС. Основні обсяги припадають на теплолюбні види, які характеризуються швидкими темпами росту та дозволяють інтенсивне їх вирощування за порівняно високих щільностей посадки. Тому при проектуванні інтегрованого комплексу більш раціонально буде відштовхуватись саме від об'єкта аквакультури та технологічних особливостей його вирощування, включаючи характеристики кормів та умови водозабезпечення. Водночас, кардинальної різниці у метаболізмі риб не спостерігається, мова буде лише йти про певні відмінності у співвідношенні між абсолютною кількістю розчинених та нерозчинених метаболітів, розподілом макроелементів них, обсягами виділеного аміаку

пропорційно згодваному корму. Тому стандартний набір макроелементів (N, P, K, Ca, Mg і S) та мікроелементів (Fe, Mn, Mo, Cu, Zn, Se) буде у вигляді незасвоєних домішок надходити у воду басейнів (Рис. 3). Основні макроелементи (N, P, K) накопичуються в технологічній воді у розчиненій формі, хоча й у зв'язаному стані їх питомі обсяги пропорційно внесеному корму достатньо вагомі (Рис. 3). Слід відзначити що потенційний дефіцит виникатиме у залізі, оскільки основна його частина виводиться із нерозчиненими домішками.

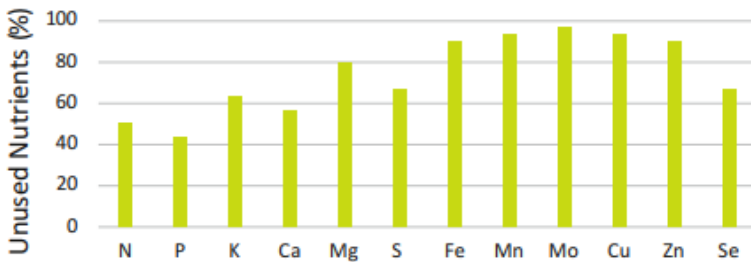


Рис. 3. Невикористані поживні речовини в аквакультурі африканського сома, які потенційно доступні для виробництва аквапонних рослин (Goddek)

Переведення вкрай токсичного для риб амоній-йону у менш шкідливу форму нітрату передбачає у подальшому також і асиміляцію цих сполук рослинами. Позитивним результатом такої діяльності буде трансформація нітрогену у зелену масу рослини, проте лімітуюча дія будь-якого з мікро- або макроелементів у водному контурі можуть обмежити ефективність даного процесу або й зовсім зупинити його. Попри те, що у рослинництві вважається вкрай позитивним чинником наявність надлишкової кількості нітратів у воді, для аквакультури це вкрай небажане явище. Тому задачею балансування у даному випадку буде контроль засвоєння рослинами основної маси нітратів з метою максимального зниження вмісту даної сполуки у воді, що повертається у рибницькі басейни.

Для збалансованого живлення рослин необхідно також враховувати і той енергетичний потенціал, який закладено у нерозчинених домішках. Відповідно до співвідношення форм макро-та мікроелементів можна спрогнозувати кількість потенційно дефіцитних елементів, що стане доступною рослинам у разі переходу з нерозчиненої у розчинену мінеральну (рис. 4). Для реалізації такої задачі необхідно передбачити влаштування споруд, у яких відбуватиметься трансформація даних елементів. Для прогнозу потреби у елементах живлення та їх співвідношенні необхідно визначити динаміку споживання кожного з елементів системою гідропоніки. Ці величини будуть залежати у першу чергу, від особливостей культур: особливі потреби виникають при вирощуванні плодкових культур (зростає питома потреба у калії, магнії та основних мікроелементах), тоді як вирощування зеленої маси потребуватиме більш-менш рівномірних пропорцій усіх елементів відповідно до хімічного складу габітусу.

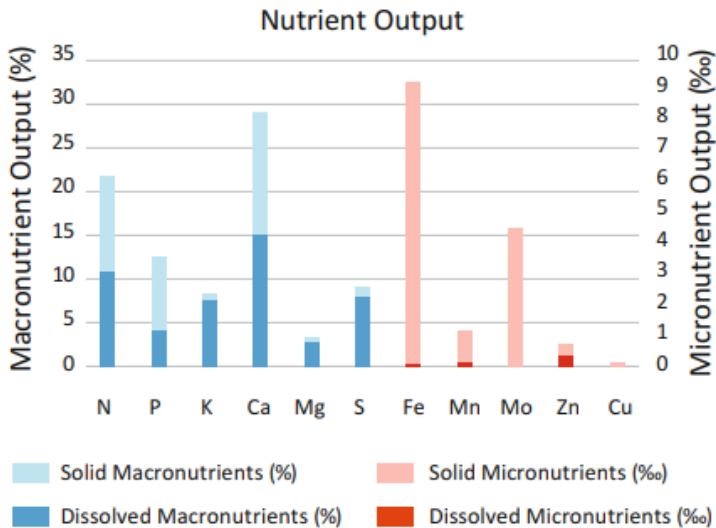


Рис. 4. Розподіл макро- та мікроелементів у технологічній воді та твердих речовинах. (Strauch та ін., 2018)

Таким чином, залежно від рівня функціональності та складності інтегрованої системи, буде відрізнятися і доступність елементів для рослин:

- Екстенсивне виробництво, - стійка до дефіциту кисню риба (наприклад, тиляпія, короп), без контролю кисню, підтримка концентрації O_2 вище 6 мг/л, незначне використання води з високою концентрацією поживних речовин, мінімальні інвестиції у технічне устаткування, низька БПК.
- Інтенсивне виробництво, стійка до дефіциту кисню риба (наприклад, африканський сом), відсутність контролю концентрації кисню (O_2 нижче 6 мг/л), значні питомі витрати води, потреба у середніх інвестиціях, високий БПК, високі концентрації поживних речовин.
- Екстенсивне виробництво, риба, що потребує кисню (наприклад, форель), обов'язковий контроль кисню, (O_2 вище 6–8 мг/л), значні обсяги використання води, середні інвестиції, низький БПК, низька концентрація поживних речовин.
- Інтенсивне виробництво, риба, що потребує кисню (наприклад, форель, судак), обов'язковий контроль кисню, (O_2 вище 6–8 мг/л), значні обсяги використання води, високі інвестиції, низький БПК, низька концентрація поживних речовин.

Оскільки періоди з певною циклічністю концентрацій забруднень є характерними для більшості РАС (під час стрімкого росту молоді обсяги згодованого корму зростають щодоби, відображаючись на утворенні відходів), для збалансованого функціонування гідропонної системи обов'язковим є вживання певних заходів, які дозволять забезпечити її спроможність видаляти з води зростаючі обсяги забруднень. Одним з найпростіших кроків, який дозволить збалансувати систему у даному випадку, є підготовка до такого періоду і висадка безпосередньо на його початку додаткової групи рослин з коротким циклом розвитку, здатних швидко нарощувати зелену масу (мікрозелень). Менш раціональним рішенням може бути включення у блок очисних споруд додаткових потужностей біофільтрів-нітрифікаторів з подальшою денітрифікацією надлишку нітриту.

Тема 11. Організація раціонального водного режиму та просторової сукцесії об'єктів культивування й очисних організмів в ІМГА

Одним з ключових питань інтегрованих комплексів з об'єктами культивування риби-рослини є їх взаємодія на рівні водного контуру. Саме водне середовище забезпечує перенесення відходів життєдіяльності риб, які трансформуються у доступні рослинам поживні сполуки, у систему гідропоніки. Водночас, відмінності у потребах та вимогах щодо фізико-хімічних параметрів води обмежують ефективність використання окремими виробничими блоками спільного водного контуру.

Принцип сполученої аквапоніки об'єднує три класи організмів: водні організми (риби, ракоподібні), бактерії та рослини, які отримують користь один від одного в закритому контурі оборотної водної системи. Вода служить, окрім середовища існування для риб, засобом транспорту поживних речовин (продуктів метаболізму риб), які перетворюються на поживні речовини для росту рослин завдяки бактеріям.

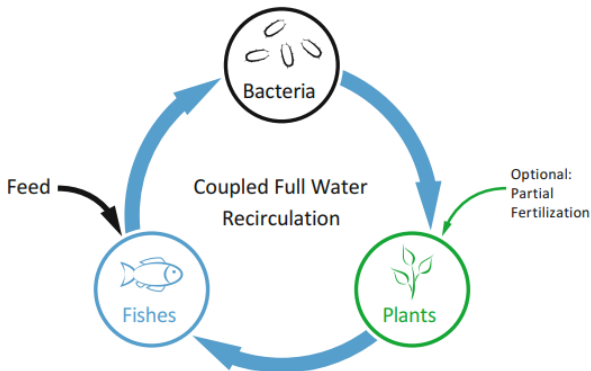


Рис. 1. Схема взаємозв'язку між компонентами інтегрованої аквасистеми.

Ідея використання відходів рибницької ферми для забезпечення підживлення рослин потребує організації транспорту таких відходів від рибницьких басейнів до системи гідропоніки та застосування окремих споруд, які дозволяють підвищити рівень доступності тих чи інших поживних компонентів, підтримувати параметри води у заданих діапазонах. Відповідно до такого підходу виникла типова аквапонічна система, яка представляла собою відокремлені басейни з рибами та лотки для вирощування рослин, об'єднані в спільному водному контурі. Таким чином, вода з рибницьких басейнів, забруднена продуктами метаболізму риб надходить у аквапонну систему, де рослини вилучають доступні їм сполуки, внаслідок чого відбувається часткове очищення води. Після цього основний потік води повертається назад у рибницькі басейни.

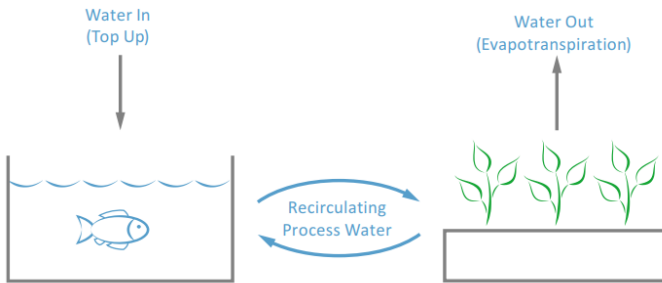


Рис. 2. Принципова схема сполученого комплексу «рибницький басейн-гідропонна система».

Оскільки у більшості випадків така система має враховувати доволі суттєві відмінності між рибами та рослинами щодо параметрів водного середовища, вона конструктивно доповнюватиметься тими блоками, які призначені для оптимізації умов утримання обох груп культивованих організмів. До того ж, очевидним є те, що рослини у системі аквапоніки не здатні забезпечити повну асиміляцію усіх форм відходів, які надходять до них від блоку аквакультури. Тому до переліку основних блоків даної системи обов'язково входять споруди з видалення нерозчинених забруднень, біореактори для

трансформації розчинених форм нітрогену у більш доступні рослинам нітрати та ін.

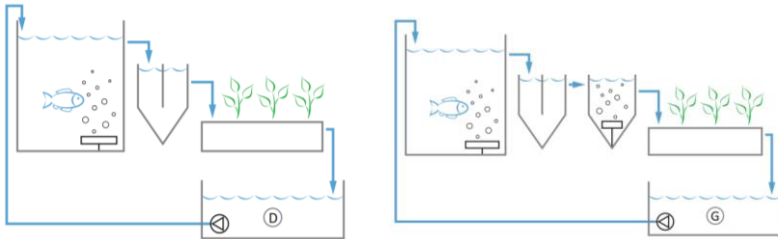


Рис. 3. Принципові схеми сполучених інтегрованих комплексів.

Масштаби виробництва зумовлюють включення у виробничий комплекс споруди із знезараження, ультрафільтрації, біозахисту, автоматизованої годівлі та підживлення рослин. При повністю замкнутій рециркуляції води, збагаченої поживними речовинами, симбіотичне співтовариство риби, рослин і бактерій потенційно має призвести до вищих результатів порівняно з відокремленим вирощуванням виробництвом риби та культивуванням рослин. Сучасне технічне оснащення дозволяє ефективно функціонувати таким системам у більшості географічних регіонів, маючи мінімальну залежність від водних ресурсів.

Водночас, найбільші обмеження для інтенсивного розвитку технологій аквапоніки пов'язані з відмінностями різних груп культивованих об'єктів у потребах та вимогах до умов культивування. Очевидно, що причиною таких проблем є саме параметри водного середовища, яке фактично сполучає між собою два блоки для культивування. Сам спектр сполук, що містяться у продуктах метаболізму риби, не можна назвати збалансованим для живлення переважної більшості рослин. Це викликає дефіцит окремих елементів, які стають лімітуючими у розвитку рослини, обмежуючи темпи росту навіть при створенні оптимальних умов за усіма іншими параметрами. Здебільшого, «дефіцитними» для рослин стають зовсім не ті елементи і сполуки, концентрації яких відносяться до лімітуючих з точки

зору максимально допустимих для вирощування риб. Таким чином, виникають потреба у введенні в систему аквапоніки додаткових підживлюючих розчинів та ризики для риб, пов'язані з залишковими концентраціями певних токсичних сполук у воді, що повертається до басейнів. Також у більшості випадків актуальною стає проблема збалансованості навантаження за відходами аквакультури з об'єктивними потребами рослинницького комплексу, що пов'язано з циклічними коливаннями у обсягах внесеного у басейни корму та нерівномірністю асиміляції поживних сполук рослинами у процесі їх розвитку, а також динамікою трансформації сполук нітрогену в біореакторах.

Враховуючи відмінності між трофічними потребами риб та рослин, класична сполучена система аквапоніки виглядала як певний компроміс між уявленнями про ідеальні умови культивування об'єктів аквакультури та рослинницької продукції. Звичайно, ефективність вирощування в обох блоках не могла бути максимальною, а надання преференцій і кращих умов для однієї частини системи оберталось суттєвим погіршенням умов культивування в іншій. Якщо наприклад підприємство орієнтоване на вирощування риби, технолог намагається створити оптимальні умови для забезпечення швидких темпів росту при раціональних нормах годівлі та з мінімальними витратами енергоресурсів. У такому випадку систему гідропоніки можна розглядати лише як допоміжний елемент, який дозволяє покращити процеси очищення води, підвищити кондиції її якості, але аж ніяк не вийти на конкурентоспроможне і ефективне вирощування рослинницької продукції. Оскільки у такому випадку для підгодівлі рослин можна буде використати лише обмежений перелік добрив, які не нестимуть загрози для риб; рН водного середовища буде знаходитись у діапазоні 6,8-7,5, що не сприятиме швидким темпам росту рослин; температура також буде виходити за рамки оптимуму для більшості рослин, включно в концентрацією у воді кисню. З точки зору вирощування риби та рослинницької продукції таке рішення цілком може бути обґрунтовано економічно, але у контексті глобального

ресурсозбереження це виглядатиме як комплекс з низькою ефективністю.

Обмежена ефективність сполучених інтегрованих аквасистем, головною причиною якої залишаються відмінності у вимогах до параметрів водного середовища риб та рослин, стала причиною пошуку інших технологічних рішень. Попри характерні недоліки прямоточної системи, яку можна також назвати роз'єднаною, пов'язані із надмірними витратами води та значним впливом на навколишнє середовище, її головною перевагою є відсутність критичних ризиків для риб, пов'язаних з якістю води після системи гідропоніки, та можливістю оптимізувати живлення рослин за допомогою добрив (Рис. 4).

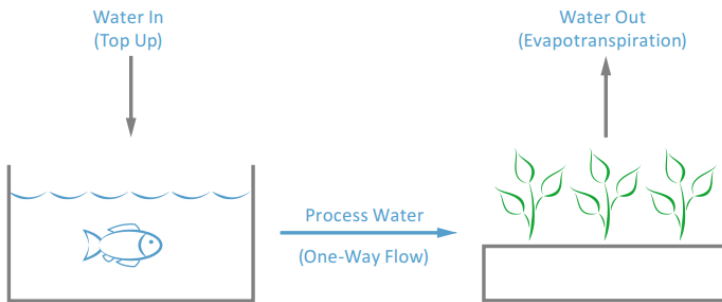


Рис. 4. Принципова схема прямоточної інтегрованої аквасистеми.

В окремих випадках такі рішення виявляються доволі раціональними, особливо, коли мова йде про РАС, де технологічна вода із високими концентраціями забруднень скидається не у природну водойму, а подається до рослинницького комплексу. У такому випадку основний водний контур РАС потребує автономного блоку очищення оборотної води, а обсяг скидної води має задовільнити потреби гідропоніки. В результаті, обсяги рослинницької продукції будуть значно нижчими, ніж обсяги виробництва аквакультури, питомі витрати вони доволі високими порівняно з сполученими інтегрованими

комплексами. Це також означає, що основний обсяг метаболітів риб, які могли б бути використані як компоненти живлення рослин, не будуть доступні рослинам, і ефективність використання енергії сировини (корму) залишиться на низькому рівні.

Основними перспективними перевагами роз'єднаних контурів в межах ІМТА є максимально повне використання енергетичного потенціалу домішок води РАС з одночасною оптимізацією процесів вирощування риб і рослин та процесів біотрансформації органічних забруднень в очисних спорудах. Створення додаткового контуру потребуватиме додаткових витрат, але у даному контексті вони можуть бути обґрунтовані не тільки з екологічної точки зору, але й певними економічними перевагами, пов'язаними з прискоренням темпів росту риб та рослин, інтенсифікацією процесів біологічного очищення. Потреба у відокремленні додаткового контуру в межах системи обґрунтовується необхідністю створити специфічні умови, відмінні від умов основних блоків, з метою оптимізації або створення умов для протікання певного процесу. Так, створення відокремленого контуру для анаеробного зброджування осадів дозволить без ризиків для риб отримувати додаткове джерело фосфору та мінералів для рослин, знизити витрати на утилізацію твердих відходів. Відокремлений контур може забезпечувати повернення води назад до того блоку, з якого вона надходить, або подачу на інший контур для наступного відокремленого процесу (Рис. 5). У порівнянні з об'єднаною системою, роз'єднана багатоконтурна буде характеризуватись значно більшою питомою площею гідропоніки на одиницю об'єму води в аквакультурі при рівних умовах. Це пов'язано, у першу чергу, з підвищенням ефективності перетворення поживних речовин та їх додатковим надходженням з нерозчиненої форми у розчинену у доступну рослинам форму (споруди біологічного очищення). Отже, необхідно буде передбачити посадку більшої кількості рослин для асиміляції біогенних елементів. Також за рахунок використання спеціалізованих добрив без ризиків для риб гідропоніка матиме тенденцію до зростання площі за економічно сприятливих умов.

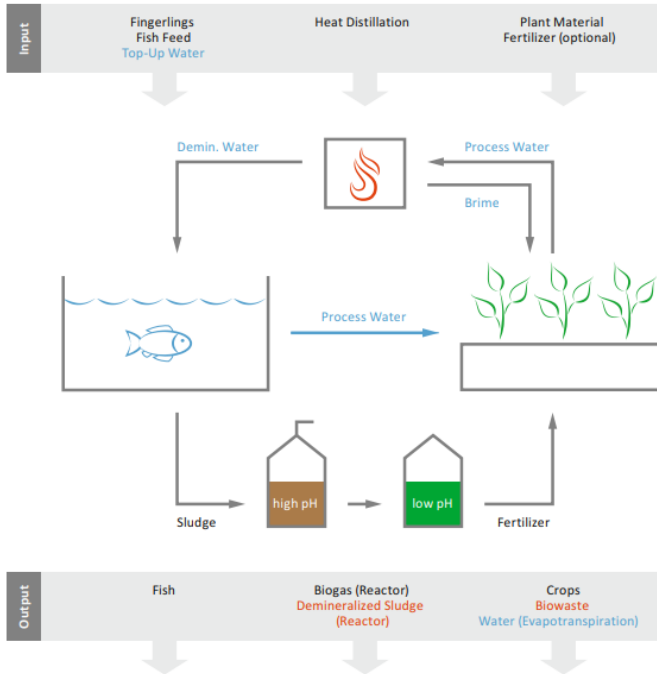


Рис. 5. Схема роз'єднаної багатоконтурної інтегрованої системи.

Важливою перевагою роз'єднаної багатоконтурної системи є також можливість підтримувати рН середовища оптимальних межах для кожного блока (Рис. 6), що вкрай важко зробити в об'єднаній одноконтурній системі.

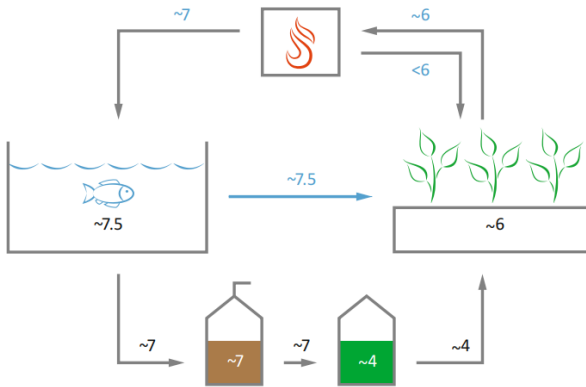


Рис. 6. Приблизні значення показника рН при його корекції в межах багатоконтурної роз'єднаної системи.

Аналогічні переваги прослідковуються у багатоконтурній системі і за іншими параметрами водного середовища (загальна мінералізація, температура).

Тема 12. Інноваційні рішення у інтегрованих системах аквакультури

1. Основні напрямки оптимізації інтегрованих систем
2. Вертикальна аквапоніка

1. Збільшення обсягів вирощування продуктів харчування в містах тепер визнано частиною вирішення продовольчої безпеки та глобального продовольства кризи (Konig et al. 2016). Тому аквапоніку сьогодні сприймають як частину глобального рішення для збільшення виробництва продуктів харчування у більш стійкий та продуктивний спосіб. Водночас, аквапонні системи самі можуть стати більш продуктивними та стійкими, використовуючи альтернативні технології вирощування та запроваджуючи інновації, такі як вертикальне землеробство та живі стіни. Крім того, завдяки економії простору їх можна краще інтегрувати в міські райони. У розвинених країнах більшість аквапонних систем розміщують у теплицях з системами контролю температури. Звичайно, багато додаткових переваг у вирощуванні їжі в контрольованих теплицях (здатність регулювати відносну вологість і контролювати рух повітря, можливість подачі вуглекислоти у парник, чіткий контроль та попередження занесення збудників хвороб) дозволяють суттєво підвищити продуктивність аквапоніки. Водночас, потреба у значних капіталовкладеннях на зведення теплиці відобразиться і на собівартості продукції.

Аквапоніка вважається однією з ключових технологій виробництва харчових продуктів з точки зору сталого та ефективного виробництва харчових продуктів, аквапоніку можна оптимізувати та зробити ще більш ефективною. Одна з ключових проблем у звичайних системах аквапоніки полягає в тому, що склад та концентрації поживні речовини у скидній воді РАС відрізняються від оптимальних параметрів для більшості розчин. Відокремлені системи аквапоніки (DAPS), які використовують воду з рибницьких басейнів, але не повертають її до контуру аквакультури, можуть бути оптимізовані шляхом введення споруд для мінералізації та мулових біореакторів, де за рахунок мікрофлори органічні речовини будуть перетворені у доступні

для рослин мінеральні сполуки. Особливо це стосується фосфору, магнію, заліза, марганцю і сірки, яких порівняно мало у скидній воді рибницьких господарств.

Таким чином, роз'єднані системи, які стабілізують осад у анаеробних спорудах, дозволяють поглибити переробку органічних відходів риби з утворенням максимальної кількості поживних речовин для росту рослин (Goddek 2017; Goddek et al. 2018). Відходи в таких систем в основному складаються з мулистих домішок (тобто фекалій і нез'їденого корму) і тому не можуть бути використані безпосередньо в системі гідропоніки. Тому біореактори є важливим компонентом, який може змінити непридатний осад на доступні для рослин добрива а також перетворити органічні відходи, такі як стебла і коріння з рослинницького комплексу в біогаз для виробництва тепла та електроенергії. Сучасне апаратне оформлення дозволяє забезпечувати автоматизований контроль параметрів води для кожного циклу або потоку, що зрештою і підвищує ефективність процесів в основних відокремлених системах (RAS, гідропоніка і біореактори). Незважаючи на те, що роз'єднані системи дуже ефективні у відновленні поживних речовин, з майже нульовими втратами поживних речовин, масштаб виробництва в кожному з блоків має бути узгоджений з іншими системами. Відповідно, на етапі проектування необхідно прорахувати баланс щодо потреб на надходжень за основними елементами, обсяги потоків, потребу у додаткових компонентах.

2. Вертикальна аквапоніка. Очевидно, що чим більш критичним буде той чи інший економічний фактор, і чим більш вагома його частка буде у собівартості продукції, тим більш актуальними виявляються пошуки щодо зниження виробничих витрат за даною статтею. Так, висока вартість земельної ділянки та вартість енергоресурсів, які необхідні для підігріву теплиці можуть обґрунтовувати перехід від традиційних горизонтальних грядок до вертикальних систем вирощування. Вертикальна система землеробства є привабливою альтернативою горизонтальній гідропонній системі вирощування, яка дозволить суттєво підвищити питому виробничу потужність з одиниці площі теплиці, знизити витрати електроенергії на освітлення за

рахунок більш ефективного використання світильників. Проте вона потребуватиме додаткового спеціалізованого устаткування, що знову таки пов'язано з додатковими капітальними витратами. Найбільш технологічними для аквапоніки виявились наступні рішення:

- Складені горизонтальні грядки: Замість однієї горизонтальної грядки, лотки складаються як стелажі у декілька ярусів. Таке розташування означає, що в оранжерейі лише верхня грядка може бути спрямована на пряме природне світло, а додаткове штучне освітлення необхідно забезпечити на всіх рівнях. Зазвичай воно розташовується безпосередньо під грядкою вище. В принципі це може означати, що стелажі можуть розташовуватись настільки високо, наскільки дозволяє висота теплиці, але, звичайно, надмірна висота лотків викликає труднощі з посадкою, обслуговуванням, збором врожаю. Також підвищуються витрати на перекачування води, виникає проблема з рівномірним розподілом води між ярусами. Досвід таких систем показав, що раціональним рішенням є влаштування 4 ярусів, а подальше зростання їх кількості не дає економічного ефекту.

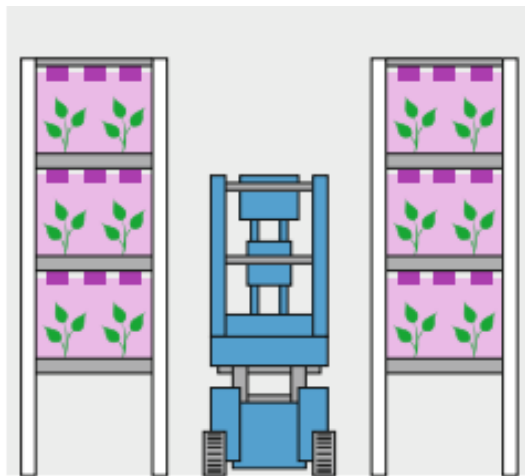


Рис. 1. Схема розміщення багаторярусної системи аквапоніки.

- Системи вертикальних башт включають системи, які дозволяють вирощувати рослини у вертикальних масивах усередині контейнера або серії модулів, складених один на одного. Залежно від системи, рослини вирощують габітусом в одному напрямку або якщо, наприклад, їх висаджують у вигляді труби, потім їх можна розташувати торцюванням у будь-який напрямок. Приклад системи вертикального масиву, де вирощуються рослини ZipGrow™, звернений в один бік, підвішується або підтримується рядами (Рис. 2). Рядки між ними приблизно 0,5 метрів (20 дюймів). Вирощування більш тривимірним способом відбувається з багатшаровими або трубчастими системами, які дозволяють вирощувати більше рослин, але потребують складних технічних рішень щодо влаштування системи освітлення. Додаткові можливості розвитку така система отримала завдяки заміні застарілих люмінесцентних та газорозрядних ламп діодними світильниками.

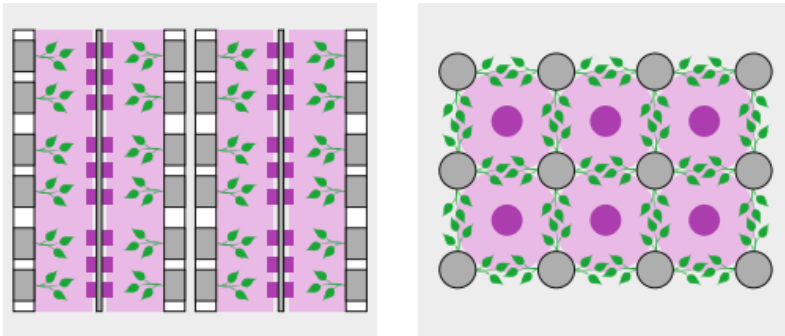


Рис. 2. Схема розміщення вертикальних башт (вигляд збоку та вигляд зверху).

- Східчасті яруси: ці системи містять жорсткі або рухомі лотки для рослин. Технологія Greens VFS у Сінгапурі використовує обертову систему лотків, яка переміщує жолоби вгору і до світла. Додаткове природне освітлення є значно інтенсивнішим нагорі та слабким на нижніх ярусах (рис. 3). Цей чинник відносять до найбільш проблемних у функціонуванні таких систем. Альтернативним варіантом є сходинокві системи,

які характеризуються безперешкодним потраплянням світла на усі поверхні, незалежно чи це природне освітлення, чи штучне. Вагомим нюансом даної системи є її обмежена висота, адже тут важливим є можливість зручного обслуговування рослин персоналом.

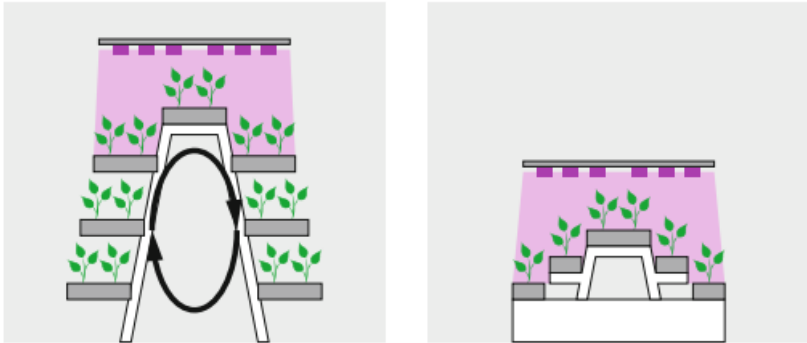


Рис. 3. Система східчастих ярусів гідропоніки (рухомі та нерухомі конструкції).

- Живі стіни. Технології «живих стін» ще не поширені в аквапоніці, за винятком кількох пробних систем наприклад, в Університеті Грінвіча, Лондон (Khandaker and Kotzen, 2018). У той час як більшість систем використовують канали для вирощування з використанням технології поживної плівки (NFT) або капсульовані блоки з мінеральної вати, LW іноді також використовують ґрунтові субстрати в горщиках або корита, які заповнені субстратом для вкорінення. Хоча це позитивно відображається на ефективності вирощування декоративних рослини, а також овочів та зелені у поєднанні з акваріумами для риб, все ж будь-яке додавання ґрунту в систему може призвести до зрушень у біоценозі системи та виявитись шкідливим для риби. Для обґрунтування конкурентоспроможності таких технологій варто провести додаткові дослідження.



Рис. 4. Фото гідропонної системи, організованої за принципом «живої стіни».

Експерименти, проведені в Університеті Грінвіча (Кхандакер і Kotzen 2018) вказують на те, що з ряду протестованих окремих інертних субстратів (включаючи перліт, соломку, мох сфагнум, мінеральну вату та кокосове волокно), саме кокосове волокно та мінеральна вата забезпечують найкращі умови проростання коренів і росту салату (*Lactuca sativa*).

Відповідно, основними чинниками, які впливатимуть на вибір тієї або іншої технології можна назвати простір, освітлення, енергія та витрати життєвого циклу.

Простір. Переваги можливості вирощувати продукцію вертикально, повинні бути збалансовані з кількістю простору, необхідного для забезпечення рівномірного розподілу освітлення, а також простору у рядах, необхідного для управління та обслуговування. Ширина ряду в гідропонних системах різна. Як зазначено у стандарті ZipGrow™ система становить приблизно 0,5 метра, тоді як звичайна ширина міжрядь

для вирощування помідорів і огірків на гідропоніці коливається від 0,9 до 1,2 метра (Badger Parker and James 2010). Для вирощування невеликих рослин, таких як салат і мікрозелень, можливо влаштувати вужчі ряди, але, ширина ряду повинна забезпечувати можливість безперешкодного доступу рухомого обладнання (візки, підйомники). Ключовою проблемою вертикального зростання є конфлікт, який виникає між фіксованими рядами і стаціонарним освітленням, яке потрібно розташовувати в міжряддях насаджень. Система освітлення буде перешкоджати рухам людей і, отже, її необхідно робити частиною рухомої конструкції або висувною чи з'ємною, щоб працівники могли легко виконувати технологічні операції. Або залишити систему освітлення стаціонарною, натомість забезпечивши рухомість самих лотків для вирощування.

Освітлення. Тепличне виробництво овочів та інших рослин орієнтовано на конкретні розміри, які дозволяють посадку, догляд і подальше збирання врожаю. Просторове розташування буде залежати від видів рослин і від рівня засобів механізації, що встановлюються. Крім того, ефективне зростання залежить від наявності додаткового освітлення різних типів, які мають свої плюси і мінуси. Важливо пам'ятати, що характеристики джерел освітлення мають забезпечувати необхідні параметри (спектр, яскравість) для росту рослин і для виробництва фруктів або квітів. Перехід на більш економічні та ефективні діодні світильники в цілому позитивно відображується на розвитку та поширенні систем аквапоніки. Більш тривалий період служби діодів (до 50 тис. годин і більше), найвища енергоефективність, мінімальний нагрів джерела випромінювання, можливість ідеального підбору спектрів відповідно до потреб рослин дозволяють не тільки суттєво знизити витрати на освітлення, а й оптимізувати світловий день за рахунок зміни інтенсивності й спектрів у задані проміжки часу.

Основним напрямком щодо оптимізації процесу штучного освітлення у сучасних системах аквапоніки є встановлення раціонального режиму роботи світильника. Набуття актуальності даним питанням пов'язане саме з поширенням діодних ламп та можливостями сучасних систем автоматизації. У кінцевому

результаті, такий раціональний режим має привести до скорочення витрат електроенергії при одночасному забезпеченні рослин необхідною кількістю світла. З біотехнологічної складової така оптимізація є доцільною, оскільки концентрація поживних речовин у воді у більшості інтегрованих систем має циклічні зміни. Відповідно, під час підвищення вмісту у воді основних біогенних елементів бажано було б забезпечити найкращі світлові умови для інтенсивної асиміляції поживних речовин. У період, коли концентрація метаболітів риб у воді перебуває на найнижчому рівні, для їх ефективного видалення у блоці аквапоніки буде достатньо менш яскравого освітлення, адже інтенсивність процесів також буде уповільнена. Таким чином, можливість моделювання світлового режиму у системі аквапоніки виглядає як один з найбільш дієвих та раціональних механізмів балансування в інтегрованому господарстві. Для успішної реалізації такої ідеї на практиці необхідно передбачити ряд заходів та включити у систему аквапоніки додаткові блоки керування. Наприклад, якщо концентрація поживних речовин має сталий графік коливань у визначений період часу, достатньо правильно запрограмувати роботу системи освітлення. При цьому варто враховувати, що інтенсивність процесів фотосинтезу зростатиме через деякий час (20-30 хв.) після підвищення яскравості освітлення. Тому зростання яскравості системи освітлення має дещо передувати зростанню концентрацій поживних речовин. Більш складні системи автоматизації можуть включати у себе датчики вмісту у воді основних біогенних елементів у воді, що надходить з рибницьких басейнів, аналізатори якості води на виході з системи аквапоніки, автоматизовані дозатори мікроелементів. Наприклад, у разі, якщо з водою надходить максимум сполук Нітрогену та Фосфору, система освітлення виходить на режим підвищеної яскравості, у воді може виникнути дефіцит окремих елементів. Відповідно, лімітування за будь-яким з потенційно дефіцитних елементів може призвести до уповільнення асиміляції сполук Нітрогену навіть при самому яскравому освітленні. Для попередження таких випадків необхідно передбачити автодозатори з потенційно дефіцитними елементами або їх сполуками.

Рекомендована література

1. Goddek S., Joyce A., Kotzen B., Burnell G. M. Editors Aquaponics Food Production Systems: Combined Aquaculture and Hydroponic Production Technologies for the Future : Springer Nature Switzerland AG, 2019. 619 p.
2. Ridler N., Hishamunda N. Promotion of sustainable commercial aquaculture in sub-Saharan Africa : Policy framework, vol 1. Rome : FAO Fisheries Technical Paper No. 408 (1), 2001. 67 p.
3. Beyond Fish Monoculture – Developing Integrated Multi-Trophic Aquaculture in Europe / Hughes A. et al. : IDREEM Final Report, 2016. 24 p.
4. Dong S., Fang J., Jansen H.M., Verreth, J. Review on integrated mariculture in China. Workpackage: support the application of integrated multi-trophic aquaculture (IMTA) : ASEM Aquaculture Platform, 2013.
4. Vilmin L., van Duren L. A. Modelling interactions and feedbacks between Integrated Multi-Trophic Aquaculture and the receiving environment in the North and Aegean Seas [Abstract] : Aquaculture Europe, 2020.
5. Кононцев С. В. Саблій Л. А., Гроховська Ю. Р. Екологічна біотехнологія очищення стічних вод та культивування кормових організмів : монографія. Рівне : НУВГП, 2011. 151 с.
6. Aquaculture. Farming Aquatic Animals and Plants / John S. Lucas, Paul C. Southgate, Craig S. Tucker : John Wiley & Sons Ltd, Third Edition, 2019. 637 p.
7. Aquaculture and Fish Farming : Cataloging-in-Publication Data Aquaculture and fish farming / Edited by Brendan Marshall : Library Pres, 2017. 215 p.
8. Саблій Л. А., Коренчук М. С., Кононцев С. В., Гроховська Ю. Р. Реалізація концепції системи інтегрованої мультитрофічної аквакультури у прісноводних рибницьких господарствах з замкнутим водопостачанням. *Вісник Хмельницького Національного Університету. Серія: Технічні науки.* 2017. №5. С. 89–93.