МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
БІЛОЦЕРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ФАКУЛЬТЕТ ЕКОЛОГІЇ, БІОРЕСУРСІВ ТА ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Спеціальність H5 Водні біоресурси та аквакультура

Допускається до захисту
Зав. кафедри водних біоресурсів та аквакультури,
доктор вет. наук, професор _____ Н.Є. Гриневич
"16" _____ 2026 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

ЕФЕКТИВНІСТЬ ФУНКЦІОНУВАННЯ БІОЗАВАНТАЖЕННЯ У СИСТЕМІ БІОЛОГІЧНОЇ ОЧИСТКИ ВОДИ ЗА ВИРОЩУВАННЯ КЛАРІЄВОГО СОМА *(CLARIAS GARIEPINUS)*

Виконав:
_____ **Григоренко Юрій Станіславович**

Керівник:
доктор вет. наук, професор
_____ **Гриневич Наталія Євгеніївна**

Рецензент:
_____ Доцент Хоміяк І.А.

Біла Церква – 2026 р.

БІЛОЦЕРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ДЕКЛАРАЦІЯ

про дотримання академічної доброчесності під час виконання кваліфікаційної роботи

Я, Григоренко Юрій Степанович,
(прізвище, ім'я, по батькові здобувача вищої освіти)

здобувач(ка) другого рівня вищої освіти за освітньою програмою Водні біоресурси та аквакультура,

підтверджую, що кваліфікаційну роботу з теми:

«ЕФЕКТИВНІСТЬ ФУНКЦІОНУВАННЯ БІОЗАВАНТАЖЕННЯ У СИСТЕМІ БІОЛОГІЧНОЇ ОЧИСТКИ ВОДИ ЗА ВИРОЩУВАННЯ КЛАРІЄВОГО СОМА *(CLARIAS GARIEPINUS)*»

виконано мною з дотриманням принципів і правил академічної доброчесності.

Підтверджую, що:

- роботу виконано особисто на основі власних розробок і суджень;
- у роботі належним чином зазначено авторство та джерела використаних текстів, ідей, даних, зображень та інших матеріалів;
- наведені результати дослідження, дані та висновки є достовірними;
- робота не містить свідомо сфабрикованої чи сфальсифікованої інформації.

У процесі виконання роботи було використано інструменти штучного інтелекту, зокрема для оформлення та редагування тексту (ChatGPT, Gemini), для перекладу тексту (Deepl, Google Translate), для створення або редагування зображень (Nano Banana 2). Відомості про це наведено в роботі згідно з вимогами законодавства та встановленими правилами академічної доброчесності.

Я усвідомлюю відповідальність за зміст кваліфікаційної роботи та дотримання вимог академічної доброчесності під час її підготовки.

Дата: 10.11.2026

Здобувач вищої освіти: _____

(підпис / кваліфікований електронний підпис)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
БІЛОЦЕРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Екологічний факультет

Спеціальність Н5 Водні біоресурси та аквакультура

ЗАТВЕРДЖУЮ

Гарант ОП "Водні біоресурси та аквакультура"
другого (магістерського) рівня вищої освіти
професор Гриневич Н.Г. [signature]
23. 09. 2025 р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу здобувачу

Григоренку Юрію Станіславовичу

Тема: "Ефективність функціонування біозавантаження у системі біологічної очистки води за вирощування кларієвого сома (*Clarias gariepinus*)"

Затверджено наказом ректора №487/С від 12. 11. 2026
Термін здачі студентом готової кваліфікаційної роботи в деканат:
до "10" 11 2026 р.
Перелік питань, що розробляються в роботі. Вихідні дані.

Інженерно-технологічне забезпечення рециркуляційних аквакультурних систем;

Екологічні та технологічні переваги вирощування риб в RAS;

Термічна стабільність та захист від теплового забруднення стічних вод.

Календарний план виконання роботи

Етап виконання	Дата виконання етапу	Відмітка про виконання
Огляд літератури	до 15.09.2026	виконано
Методична частина	до 21.09.2026	виконано
Дослідницька частина	до 09.10.2026	виконано
Оформлення роботи	до 27.10.2026	виконано
Перевірка на плагіат	до 05.11.2026	виконано
Подання на рецензування	до 10.11.2026	виконано
Попередній розгляд на кафедрі	16.11.2026	виконано.

Керівник кваліфікаційної роботи:

професор Грищенко Ю.С. _____

(вчене звання, прізвище, ініціали) *(підпис)*

Здобувач:

Грищенко Ю С _____

(прізвище, ініціали) *(підпис)*

Дата отримання завдання "13" 09 2025 р.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ 3

РЕФЕРАТ 4

ВСТУП 8

Розділ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ 9

1.1. Інженерно-технологічне забезпечення рециркуляційних аквакультурних систем 9

1.2. Екологічні та технологічні переваги вирощування риб в RAS 15

1.3. Термічна стабільність та захист від теплового забруднення стічних вод 19

Розділ 2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ 29

Розділ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ 31

3.1. Трансформація аквакультури на засадах екологічної сталості 31

3.2. Основні технологічні вузли та принципи роботи установок замкнутого водопостачання 32

3.3. Обґрунтування вирощування кларієвого сома у самостійно спроєктованій рециркуляційній аквакультурній системі 38

ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ 46

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 47

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

РАС	Рециркуляційна аквакультурна система
ОВП	Окисно-відновний потенціал
ПЛК	Програмовані логічні контролери
ПВХ	Полівінілхлорид
МК	Модульна конструкція
УФ	Ультрафіолетове випромінювання
БФ	Біологічний фільтр
МФ	Механічний фільтр
ISO	International Organization for Standardization
FCR	Feed Conversion Ratio

РЕФЕРАТ

магістерської роботи ***Григоренка Юрія Станіславовича***

на тему: ***“Ефективність функціонування біозавантаження у системі біологічної очистки води за вирощування кларієвого сома (Clarias gariepinus)”.***

Мета роботи оцінити ефективність функціонування різних типів біозавантаження у системі біологічної очистки води за вирощування кларієвого сома шляхом визначення їхньої здатності забезпечувати трансформацію сполук азоту, стабілізацію гідрохімічних показників та підтримання належної якості водного середовища в умовах рециркуляційної аквакультурної системи.

Методи проведення досліджень. Для досягнення поставленої мети застосовували комплекс взаємопов’язаних методів досліджень: аналітичні, гідрохімічні, експериментальні, статистичні методи досліджень.

Результати досліджень. Встановлено, що використання модульної системи водоочищення, яка передбачає послідовне поєднання механічної фільтрації, біологічного очищення та ультрафіолетового знезараження, забезпечує комплексне поліпшення якості води в рециркуляційній аквакультурній системі за вирощування кларієвого сома. Такий технологічний підхід сприяє зниженню вмісту завислих частинок, біологічній трансформації розчинених азотовмісних сполук і зменшенню мікробного навантаження на водне середовище. Застосування вдосконаленої системи водоочищення позитивно позначалося на продуктивних показниках риб, створюючи сприятливіші умови для їх утримання та вирощування. Важливу роль у підтриманні належної якості води відігравало функціонування біофільтра, біологічне завантаження якого забезпечувало перебіг процесів нітрифікації. За встановленого навантаження його продуктивність за нітрифікацією становила 16,5 г азоту за годину, що супроводжувалося відсутністю різкого підвищення концентрації амонійних сполук у воді. При цьому не спостерігалося різкого підвищення концентрації амонійних сполук у воді, що вказує на належне функціонування біофільтру.

Галузь використання результатів. Результати магістерської дослідної роботи можуть бути використані для удосконалення технології вирощування кларієвого сома в рециркуляційних аквакультурних системах.

Структура та обсяг роботи. Магістерську роботу викладено на 53 сторінках комп'ютерного набору тексту. Вона складається із вступу, огляду літератури, матеріалів та методики дослідження, результатів дослідження, висновків та пропозицій, списку використаних джерел. Робота містить 1 рисунок. Опрацьовано 52 літературних джерела.

Ключові слова: *Clarias gariepinus*, рециркуляційна аквакультурна система, біофільтр, біозавантаження, біологічне очищення води, нітрифікація.

ANNOTATION

master's thesis ***Yurii Hryhorenko***

on the topic: ***"Performance of the bio-media in a biological water treatment system for the culture of African catfish (Clarias gariepinus)".***

The aim of this study is to assess the effectiveness of different types of bio-load in a biological water treatment system used for the rearing of African catfish by determining their ability to facilitate the transformation of nitrogen compounds, stabilise hydrochemical parameters and maintain the appropriate quality of the aquatic environment within a recirculating aquaculture system.

Research methods. To achieve the stated objective, a set of interrelated research methods was employed, including analytical, hydrochemical, experimental, and statistical methods.

Research results. It has been established that the use of a modular water treatment system incorporating a sequential combination of mechanical filtration, biological treatment, and ultraviolet disinfection ensures a comprehensive improvement in water quality within a recirculating aquaculture system used for the cultivation of African catfish. This technological approach facilitates the reduction of suspended solids, the biological transformation of dissolved nitrogenous compounds, and a decrease in the microbial load within the aquatic environment. The implementation of this advanced water treatment system had a positive impact on the performance indicators of the fish, creating more favorable conditions for their maintenance and growth. The operation of the biofilter played an important role in maintaining proper water quality, as its biological media facilitated nitrification processes. Under the applied load, its nitrification capacity reached 16.5 g of nitrogen per hour, with no sharp increase in the concentration of ammonium compounds in the water. The absence of any such spike in ammonium concentrations indicates that the biofilter was functioning effectively.

Field of application of the results. The results of the master's research work can be used to improve the technology for rearing African catfish in recirculating aquaculture systems.

Structure and scope of the work. Master's thesis is presented on 53 pages of computer typing. It consists of an introduction, a literature review, research materials and methods, research results, conclusions and suggestions, and a list of references. The paper contains 1 figures. The article is based on 52 literature sources.

Keywords: *Clarias gariepinus*, recirculating aquaculture system, biofilter, bio-media, biological water treatment, nitrification.

ВСТУП

Інноваційні технології розведення риб включають в себе широкий спектр методів, які спрямовані на покращення ефективності, якості і екологічної стійкості аквакультури. Технології, які зараз використовуються у цій галузі – вирощування у закритих системах. Ця технологія полягає у тому, щоб розводити риб у спеціально обладнаних закритих приміщеннях у басейнах. Це дозволяє контролювати умови середовища, такі як температура, рівень кисню та рівень забруднення води, забезпечуючи оптимальні умови для росту риб, використання технології рециркуляції води. Ця технологія дозволяє зменшити споживання води та витрати енергії, переробляючи та очищаючи воду, що циркулює у системі замкнутого водопостачання.

Це допомагає знизити негативний вплив аквакультури на довкілля та знижує витрати на управління водним середовищем [12].

Інновації в генетиці дозволяють розробляти гібридних та генетично модифікованих видів риб, що мають покращені характеристики, такі як швидкість росту, опірність до хвороб або покращені смакові якості [19].

Використання автоматизованих систем керування та моніторингу. Сучасні технології дозволяють автоматизувати багато аспектів управління риборозведенням, включаючи годівлю, контроль якості води та моніторинг здоров’я риб. Це допомагає підвищити ефективність та забезпечити високу якість продукції.

Використання інтегрованих систем вирощування риб та рослин – аквапоніка. Це система, що поєднує вирощування риб та рослин в одній системі. Риби надають відходи, які утворюють добриво для рослин, тоді як рослини очищують воду, що повертається до акваріуму риб [31].

Рециркуляційні аквакультурні системи (RAS) – це передова технологія, яка дозволяє ефективно вирощувати рибу забезпечуючи ефективне використання води, контрольовані умови росту риби та зниження негативного впливу на навколишнє середовище.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

1.1. Інженерно-технологічне забезпечення рециркуляційних аквакультурних систем

Підтримання якості водного середовища в рециркуляційних системах аквакультури забезпечується завдяки багаторівневому комплексу фільтрації. Хоча кожен тип очищення виконує свою специфічну функцію, разом вони формують єдину технологічну лінію, що видаляє як видимі тверді забруднення, так і невидимі розчинені токсини, які виділяються рибою в процесі життєдіяльності [51].

Комплексна система очищення складається з трьох фундаментальних етапів: Механічна фільтрація (первинне очищення): Цей етап відповідає за негайне видалення з води великих і дрібних твердих часток – нез'їденого корму, фекалій риб та інших суспендованих (завислих) речовин. Для цього використовуються механічні фільтри різного типу (найчастіше барабанні, дискові або піщані). Своєчасне відсікання твердого осаду є критично важливим, оскільки його гниття у воді різко підвищує навантаження на наступні рівні очищення. Біологічна фільтрація (серце системи рециркуляції): Цей компонент є головним біологічним бар'єром, який відповідає за очищення води від розчинених хімічних токсинів – насамперед аміаку (NH_3) та амонію, які риби виділяють через зябра та з відходами [2, 11, 13].

У біофільтрі використовуються спеціальні наповнювачі (завантаження – статичні та динамічні) з величезною площею поверхні, де заселяються й розмножуються колонії корисних нітрифікуючих бактерій. Ці мікроорганізми здійснюють процес нітрифікації: спочатку перетворюють смертельно небезпечний аміак на токсичні нітрити, а потім – на відносно безпечні нітрати, які згодом виводяться із системи або поглинаються рослинами в аквапоніці. Хімічна фільтрація (тонке кондиціонування): Допоміжний етап, призначений для усунення розчинених органічних сполук, специфічних запахів, присмаків та

забарвлення води, з якими не впоралися механічні та біологічні фільтри. Для цього застосовуються сорбенти (наприклад, активоване вугілля, цеоліт), а також процеси озонування та флотації (піновідділення), що допомагає підтримувати ідеальну прозорість і хімічну чистоту води. Завдяки такій триступеневій архітектурі очищення, вода в системі (RAS) постійно оновлюється та кондиціонується. Це дозволяє роками використовувати один і той самий об’єм водних ресурсів, гарантуючи безпечне та здорове середовище для максимального росту риби [9, 21].

Забезпечення безперервного та стабільного постачання кисню виділяється як найкритичніший фактор життєзабезпечення в інтенсивній аквакультурі. Оскільки щільність посадки риби в рециркуляційних системах рециркуляції (RAS) у десятки разів перевищує природну, звичайної аерації (нагнітання атмосферного повітря) стає категорично недостатньо.

Для підтримання оптимального гідрохімічного балансу в сучасних комплексах впроваджують високотехнологічні системи штучного нагнітання чистого кисню. Ефективне кисневе забезпечення реалізується за допомогою спеціалізованого обладнання та виконує низку життєво важливих функцій: Генерація та розчинення чистого газу: Замість звичайного повітря (яке містить лише близько 21% кисню) у воду за допомогою кисневих конусів (оксигенаторів), низьконапірних інжекторів або дифузорів нагнітається чистий 90–95% кисень, отриманий із молекулярних концентратів. Це дозволяє досягти надвисокого рівня насичення води (гіпернасичення) [7, 16].

Стимуляція метаболізму та росту: оптимальний і стабільний рівень розчиненого кисню (зазвичай від 80% до 120% насичення залежно від виду риби) безпосередньо впливає на апетит гідробіонтів. Риба значно краще засвоює корм, що радикально знижує коефіцієнт конверсії корму (FCR) та прискорює терміни досягнення товарної ваги. Підтримка роботи біофільтра: нітрифікуючі бактерії, які очищають воду від токсичного аміаку в біологічному фільтрі, є аеробними організмами. Вони споживають величезну кількість кисню для окислення азотистих сполук. Без потужної оксигенації біофільтр просто припинить свою роботу [3, 4].

Нівелювання стресу та захист від замору: автоматизовані системи кисневого живлення миттєво реагують на пікові навантаження (наприклад, одразу після годівлі риби, коли споживання кисню різко зростає), запобігаючи небезпечним для життя асфіксіям (заморам). У підсумку, професійна система оксигенації дозволяє фермерам безпечно збільшувати щільність посадки риби до максимальних меж, гарантуючи високу продуктивність підприємства та захищаючи бізнес від критичних втрат у разі раптових змін зовнішніх умов [1, 18].

Впровадження автоматизованих систем вимірювання та контролю стала головним технологічним фундаментом, який перетворює сучасне рибництво (аквакультуру) на точне, прогнозоване та повністю кероване виробництво. У системах рециркуляційної аквакультури, де щільність посадки риби є максимальною, навіть незначне та короткочасне відхилення показників води від норми може призвести до стресу, хвороб або загибелі аквакультури [5, 10].

Інтелектуальні платформи моніторингу дозволяють здійснювати безперервний аудит гідрохімічних і фізичних параметрів у режимі 24/7, повністю виключаючи людський фактор та забезпечуючи миттєву реакцію на будь-які зміни. Сучасний комплекс автоматизованого управління охоплює збір, аналіз та оптимізацію критично важливих параметрів середовища: моніторинг життєво необхідних показників: спеціалізовані занурювальні датчики (зонди) безперервно вимірюють рівень розчиненого кисню, температуру води, рівень водневого показника (pH), електропровідність, рівень солоності, а також окисно-відновний потенціал (ORP / Redox) [32, 52].

Останній показник – ключовий індикатор чистоти води та ефективності роботи систем озонування, оскільки він відображає здатність середовища до самоочищення та ступінь руйнування органічних забруднень. Автоматична оптимізація та зворотний зв’язок (Scada-системи): інформація з датчиків надходить на центральний контролер, який не просто фіксує дані, а й самостійно керує обладнанням. Якщо рівень кисню падає, система автоматично відкриває електромагнітні клапани нагнітання чистого кисню; якщо вода охолоджується – вмикаються теплообмінники; якщо змінюється pH –

дозуються відповідні реагенти для стабілізації буферної ємності води [27, 33, 40].

Аварійне сповіщення та захист від ризиків (Redundancy): автоматика оснащена багаторівневими системами сигналізації. У разі критичного виходу параметрів за межі норми, аварійного вимкнення електроенергії або зупинки насосів, система миттєво запускає резервні генератори, відкриває аварійні балони з киснем та надсилає екстрені push-сповіщення або SMS на телефони операторів і технологів. Аналітика та прогнозування на основі Big Data: сучасні програмні комплекси накопичують історію змін усіх параметрів. Це дозволяє аналізувати динаміку споживання кисню рибою після годівлі, оцінювати ефективність роботи біофільтра, прогнозувати терміни планового обслуговування датчиків та оптимізувати витрати електроенергії і палива. У підсумку, автоматизація процесів моніторингу та управління створює бездоганно стабільний і безпечний екосвіт усередині рециркуляційної системи. Це дає змогу технологам зосередитися на стратегічних завданнях, гарантує максимальний темп росту риби, мінімізує експлуатаційні ризики та забезпечує найвищу економічну рентабельність бізнесу [15, 22, 38].

Впровадження автоматизованих систем дозованої та керованої годівлі одним із найефективніших інструментів підвищення рентабельності сучасних рециркуляційних комплексів. Оскільки витрати на корми у промисловому рибництві становлять від 50% до 70% від усіх операційних витрат, точність їх розподілу безпосередньо визначає фінансовий успіх підприємства. Автоматика дозволяє повністю відійти від суб’єктивного ручного оцінювання, забезпечуючи подачу поживних речовин відповідно до суворих біологічних потреб риби. Сучасні технології управління кормороздачею функціонують як інтелектуальні комплекси та вирішують низку критичних завдань: прецизійне порційне дозування: автоматизовані годівниці (маятникові, стрічкові або пневматичні) контролюються центральним комп'ютером, який розраховує добовий раціон на основі поточної біомаси риби, її віку, а також температури води та рівня кисню. Корм подається дрібними порціями через рівні проміжки часу, що гарантує його максимальне засвоєння. Комп’ютерний зір та

акустичний моніторинг: Передові системи (RAS) інтегрують підводні відеокамери та гідрофони, підключені до нейромереж (штучного інтелекту). Вони аналізують поведінку риби в режимі реального часу: щойно активність у зоні годування падає і гранули починають опускатися на дно (риба наситилася), комп'ютер миттєво припиняє подачу. Це повністю виключає перевитрату дорогої сировини. Зниження навантаження на систему фільтрації: Нез'їдений корм, що розчиняється у воді, є головним джерелом токсичного аміаку та фосфатів, які перевантажують біофільтр і забруднюють механічні барабани. Точне дозування запобігає гниттю залишків їжі, допомагаючи підтримувати ідеальну прозорість та хімічну чистоту води. Рівномірний розподіл та зменшення стресу: Автоматичні системи (особливо пневматичні) розкидають корм по всій площі дзеркала басейну. Це усуває внутрішньовидову конкуренцію, коли сильніші та більші особини відтісняють слабших від кормової плями. У результаті все стадо росте рівномірно (однорідна фракція), що спрощує подальше сортування та збут риби. У підсумку, автоматизація годівлі кардинально покращує коефіцієнт конверсії корму (FCR), дозволяючи отримувати більше кілограмів товарної риби з кожного кілограма придбаного корму. Це не лише стимулює імунітет та прискорює життєвий цикл аквакультури, а й мінімізує екологічний слід виробництва, роблячи бізнес стабільним і висококонкурентним [8, 20, 35].

Забезпечення бездоганної екологічної та мікробіологічної безпеки в рециркуляційних системах аквакультури (RAS) базується на використанні мультібар'єрних технологій фінішного очищення і дезінфекції води. Традиційні методи фільтрації здатні затримати лише великі органічні сполуки, тоді як інноваційні фізико-хімічні процеси забезпечують повне кондиціонування водного потенціалу системи та її абсолютну стерилізацію від патогенної мікрофлори. Сучасна архітектура знезараження та мікроструктурної регенерації води в промислових RAS-комплексах містить чотири фундаментальні технологічні ланки: Ультрафільтрація (баромембранне розділення): процес пропускання води крізь напівпроникні мембрани з розміром пор від 0,01 до 0,1 мкм. Ця технологія дозволяє на молекулярному рівні відсікати дрібнодисперсні

завислі речовини, колоїдні розчини, високомолекулярну органіку, а також бактерії та віруси, забезпечуючи максимальну прозорість води. Озонування (високопотенційне окиснення): озон діє як один із найпотужніших екологічно безпечних окиснювачів. Він миттєво руйнує клітинні мембрани патогенів, окиснює розчинені гумінові речовини (усуваючи жовтуватий колір та специфічний запах води), а також переводить токсичні нітрити в безпечні нітрати. Після реакції озон швидко розпадається до звичайного кисню, додатково насичуючи середовище. UV-очищення (фотохімічна деструкція): проходження води через камери з ультрафіолетовим випромінюванням (довжина хвилі ~254 нм) викликає незворотні руйнування в структурі ДНК і РНК хвороботворних бактерій, вірусів, грибків та найпростіших. Це повністю блокує їхню здатність до розмноження, причому метод не змінює хімічний склад води та не утворює токсичних побічних продуктів. Іонізація (електрохімічне кондиціонування): збагачення води іонами певних металів (наприклад, срібла чи міді) або електрохімічна активація води створює тривалий залишковий бактерицидний та альгіцидний ефект, стримуючи розвиток синьо-зелених водоростей та бактеріального нальоту на стінках трубопроводів і басейнів. Глобальне значення технології RAS для індустрії синергетичний ефект від інтеграції цих компонентів дозволяє розгорнути повномасштабне промислове вирощування цінних видів риби з рекордно низьким коефіцієнтом водоспоживання. Завдяки безперервній циркуляції та глибокій регенерації, система RAS щодня потребує оновлення лише 1–5% від загального об’єму води, що кардинально знижує навантаження на природні підземні та поверхневі джерела. Локалізація та концентрування технологічних відходів усередині станції очищення унеможливлює транзит шкідливих речовин у навколишнє середовище, виключаючи ризик евтрофікації природних водойм. Таким чином, інноваційні рециркуляційні системи (RAS) виступають не просто інструментом підвищення бізнес-рентабельності, а єдиним екологічно виправданим і прогнозованим майбутнім світової аквакультури, що гарантує продовольчу безпеку без шкоди для планети [6, 37, 43].

1.2. Екологічні та технологічні переваги вирощування риб в RAS

Впровадження рециркуляційних систем водопостачання (RAS – Recirculating Aquaculture Systems) на сьогодні є одним із найбільш інноваційних та ефективних методів раціонального й ощадливого використання водних ресурсів у сфері промислової аквакультури. Функціонування таких спеціалізованих комплексів базується на технології глибокого багатоступеневого очищення відпрацьованої води. Проходячи крізь блоки механічної фільтрації, біофільтри для нейтралізації токсичних сполук азоту, а також системи знезараження (озонування та ультрафіолетове опромінення), вода повністю відновлює свої фізико-хімічні властивості. Це дозволяє безперервно й циклічно повертати її назад у рибницькі басейни для повторного використання [46, 47].

Завдяки замкнутому циклу такий технологічний підхід кардинально знижує обсяги споживання свіжої води з природних джерел. У порівнянні з традиційними відкритими (проточними) системами рибництва, де використані водні маси безповоротно й без очищення скидаються в навколишнє середовище, RAS потребує лише незначного підживлення для компенсації випаровування [9, 42].

Окрім суттєвої економії та збереження дефіцитних природних ресурсів, рециркуляція виконує важливу природоохоронну функцію, дозволяючи мінімізувати екологічне навантаження на місцеві водойми через усунення ризику їх евтрофікації та забруднення органічними відходами. Водночас ізольованість системи гарантує стабільний, суворо контрольований мікроклімат, оптимальний рівень кисню та температурний режим для вирощування аквакультури, повністю нівелюючи вплив негативних зовнішніх умов, сезонних коливань чи погодних факторів [14, 28].

Практичне застосування закритих систем водопостачання (RAS) відкриває перед сучасними рибоводами унікальну можливість здійснювати прецизійний (високоточний) моніторинг та автоматизоване керування всіма ключовими гідрохімічними й фізико-хімічними показниками водного середовища в режимі реального часу. На відміну від традиційного вирощування

у відкритих водоймах, де фермер повністю залежить від примх природи, сезонних змін та погодних аномалій, штучно створене середовище дозволяє моделювати та безперервно підтримувати еталонний баланс життєво важливих параметрів [10, 20].

До них належать [23, 26, 39]:

Оптимальний температурний режим: забезпечує стабільне тепло або прохолоду відповідно до індивідуальних біологічних потреб конкретного виду риби (наприклад, осетрових, форелі чи сома). Це дозволяє повністю нівелювати закономірне для дикої природи зимове уповільнення процесів і досягти цілорічного, безперервного росту гідробіонтів.

Інтенсивна насиченість киснем (оксигенація): штучне збагачення води киснем до оптимальних значень повністю запобігає ризикам виникнення гіпоксії (кисневого голодування). Це суттєво стимулює активне живлення, прискорює загальний метаболізм і покращує засвоєння поживних речовин.

Стабільний водневий показник (pH) та солоність: завдяки буферним системам та автоматичному дозуванню реагентів повністю виключаються різкі коливання цих параметрів, які в природних умовах часто викликають сильний хімічний стрес, осморегуляторні збої та навіть загибель молоді.

Контроль рівня азотистих сполук: Завдяки інтеграції високоефективних біофільтрів у систему відбувається постійне й безперервне видалення або трансформація токсичного аміаку (NH_3) та нітритів (NO_2^-) у відносно безпечні нітрати (NO_3^-), що запобігає хронічному отруєнню риби.

Такий тотальний і абсолютний контроль над екологічними факторами мінімізує вплив будь-яких стресових подразників на організм риб. Це кардинально знижує ризик спалахів інфекційних, бактеріальних чи паразитарних захворювань, а також природним шляхом стимулює ендогенний імунітет аквакультури, виключаючи необхідність масового застосування антибіотиків.

У кінцевому підсумку, глибока автоматизація та цифровізація всіх процесів життєзабезпечення гарантують максимальну швидкість набору товарної маси, суттєво покращують коефіцієнт конверсії корму (зменшуючи

його витрати на кілограм приросту), що трансформується у стабільно високу продуктивність, прогнозованість бізнесу та максимальну рентабельність усього рибного господарства [17].

Інноваційне керування водним середовищем в аквакультурі відкриває перед сучасними рибоводами унікальну можливість здійснювати прецизійний (високоточний) моніторинг та автоматизоване керування всіма ключовими гідрохімічними, фізичними й біологічними показниками водного середовища в режимі реального часу. На відміну від традиційного вирощування риби у відкритих водоймах, садках чи руслових ставках, де фермер повністю беззахисний перед примхами природи, сезонними змінами, засухами чи погодними аномаліями, штучно створене середовище дозволяє моделювати та безперервно підтримувати еталонний баланс життєво важливих параметрів. RAS повністю ізолює виробничий цикл від зовнішнього середовища, перетворюючи рибництво з ризикованого промислу на високотехнологічний, прогнозований та індустріальний бізнес [17, 24].

Для забезпечення максимальної життєздатності гідробіонтів інтегровані системи автоматизації безперервно контролюють та коригують такі критичні параметри:

Оптимальний температурний режим: система підтримує стабільне тепло або прохолоду відповідно до індивідуальних біологічних потреб конкретного виду риби (наприклад, +22...+24°C для теплолюбного кларієвого сома чи тиляпії, або +14...+16°C для вибагливої до холоду райдужної форелі). Завдяки промисловим теплообмінникам, чиллерам та тепловим насосам повністю нівелюється закономірне для дикої природи зимове уповільнення метаболізму (анабіоз). Це дозволяє досягти цілорічного, безперервного та рівномірного росту гідробіонтів без сезонних пауз [15, 29].

Інтенсивна насиченість киснем (оксигенація): штучне збагачення води чистим киснем за допомогою кисневих конусів (оксигенаторів) або низьконапірних деаераторів підтримує рівень насиченості на оптимальних значеннях (часто вище 100% насичення). Це повністю запобігає ризикам виникнення гіпоксії (кисневого голодування), яка у відкритих ставках влітку

призводить до масового замору риби. Стабільний рівень O_2 суттєво стимулює активне живлення, прискорює метаболічні процеси та забезпечує повне розщеплення поживних речовин в організмі [25, 34].

Стабільний водневий показник (pH) та солоність: завдяки буферним хімічним системам та автоматичному мікродозуванню коригуючих розчинів (наприклад, лужних компонентів для нейтралізації закислення), в системі повністю виключаються різкі добові коливання pH. У природних умовах такі стрибки викликані цвітінням водоростей і викликають у риб сильний хімічний стрес, руйнування зябрового епітелію та осморегуляторні збої. Контроль солоності, своєю чергою, дозволяє створювати ідеальне середовище для прохідних видів риб (наприклад, під час вирощування лососевих чи осетрових на різних етапах розвитку) [18, 30].

Глибокий контроль та утилізація азотистих сполук – найскладніший елемент хімічного балансу УЗВ. В процесі життєдіяльності та розпаду залишків корму у воду виділяється високотоксичний аміак (NH_3). Завдяки безперервній циркуляції вода подається на біофільтри, де колонії корисних нітрифікуючих бактерій (Nitrosomonas та Nitrobacter) здійснюють двоступеневу біологічну фільтрацію. Спочатку отруйний аміак окислюється до нітритів (NO_2^-), а потім – до відносно безпечних для риби нітратів (NO_3^-), концентрація яких контролюється регулярним мінімальним освіженням води або за допомогою денітрифікаційних установок [6, 12, 22].

Інструменти моніторингу – датчики та SCADA-системи. Прецизійне керування реалізується за допомогою розгалуженої мережі заглибних промислових оптичних та гальванічних датчиків, які працюють 24/7. Інформація від датчиків температури, оптичних сенсорів розчиненого кисню (DO), електродів pH та ОВП (окисно-відновного потенціалу) надходить на програмовані логічні контролери (ПЛК). Дані візуалізуються в системах SCADA або мобільних додатках технологів. У разі відхилення будь-якого параметра від норми хоча б на 2-3%, автоматика миттєво реагує: збільшує подачу кисню, вмикає підігрів або форсує промивку барабанних механічних фільтрів, паралельно надсилаючи екстрене сповіщення оператору

підприємства. Вплив на біологію риби, конверсію корму та рентабельність. Такий тотальний і абсолютний контроль над екологічними факторами повністю мінімізує вплив будь-яких стресових подразників на організм риб [36].

Оскільки риба є поекилотермною (холоднокровною) істотою, її імунітет безпосередньо залежить від параметрів води. Відсутність стресу кардинально знижує ризик спалахів інфекційних, бактеріальних чи паразитарних захворювань, а також природним шляхом стимулює ендогенний (внутрішній) імунітет аквакультури. Це дозволяє підприємству повністю відмовитися від масового профілактичного застосування антибіотиків та агресивної хімії, гарантуючи екологічну чистоту та преміальну якість кінцевого продукту. З точки зору економіки, ідеальний гідрохімічний баланс створює умови для феноменального покращення коефіцієнта конверсії корму (FCR – Feed Conversion Ratio) [22, 41].

Коли риба не витрачає енергію на адаптацію до холоду, боротьбу з токсинами чи пошук кисню, практично 100% поживних речовин якісного екструдованого корму спрямовується виключно на анаболізм – побудову м’язової тканини. У результаті глибока автоматизація та цифровізація процесів життєзабезпечення в RAS забезпечують максимальну швидкість набору товарної маси. Скорочення терміну вирощування риби до товарного вигляду в 1.5–2 рази порівняно зі ставками. Мінімізацію витрат дорогого корму на кожен кілограм приросту. Все це безпосередньо трансформується у стабільно високу, прогнозовану продуктивність рибного господарства, мінімізує операційні ризики та гарантує максимальну рентабельність і швидку окупність інвестованого капіталу [48, 50].

1.3. Термічна стабільність та захист від теплового забруднення стічних вод

Вода, що виходить із промислових рибницьких басейнів, зазвичай має вищу температуру, ніж вода у природних річках чи озерах (особливо в осінньо-зимовий період). Скидання великих об’ємів такої води у відкриті водойми викликає так зване «теплове забруднення», яке порушує природні цикли

нересту дикої риби та стимулює розвиток шкідливих синьо-зелених водоростей [14, 19].

В системах замкнутого типу об'єм підживлення свіжої води становить лише 1–5% від загального об’єму системи на добу (для компенсації випаровування та промивки фільтрів). Перед рідкісними санітарними скидами ця незначна кількість води проходить через буферні резервуари-усереднювачі та теплообмінники, де її температура вирівнюється до природних показників навколишнього середовища, виключаючи будь-який тепловий шок для локальної екосистеми [45].

Інструменти екологічної нейтральності RAS: від утилізації до циркулярної економіки. Завдяки інженерній досконалості сучасних систем RAS накопичений органічний осад повністю ізолюється, що дозволяє реалізувати безвідходний цикл виробництва за кількома основними напрямками [30, 44, 48]:

Надійне вилучення осаду з екосистеми: концентрований органічний осад (шлам) за жодних умов не потрапляє у дику природу. Завдяки автоматизованій системі змиву та дренажу він оперативно й безперервно вилучається із загального контуру циркуляції води у спеціальні закриті герметичні резервуари, що унеможливлює його вимивання у ґрунтові води чи відкритий ґрунт.

Ефективне запобігання евтрофікації водойм: на відміну від відкритих ферм, RAS утримує всередині замкнутого контуру величезну кількість сполук азоту (N) і фосфору (P), які є головними каталізаторами екологічних катастроф. Своєчасне затримання цих елементів надійно перешкоджає їх винесенню в місцеві річки, струмки та озера. Це захищає природні водойми від бурхливого, неконтрольованого цвітіння токсичних синьо-зелених водоростей, запобігає літнім заморам дикої риби через дефіцит кисню та рятує локальні водні екосистеми від повного біологічного руйнування та деградації.

Вторинне використання відходів у рамках циркулярної економіки: накопичений у процесі фільтрації органічний осад розглядається сучасним бізнесом не як проблема для утилізації, а як цінний відновлюваний ресурс. Завдяки концепції циклічної (циркулярної) економіки, цей шлам піддають

дегідратації (зневодненню) та подальшій переробці на високоякісні, екологічно безпечні біодобрива для потреб інтенсивного сільського господарства. Крім того, високий вміст метаноутворювальних органічних компонентів дозволяє використовувати осад у біогазових установках як ефективну косубстратну сировину для генерації «зеленої» теплової та електричної енергії.

Синергетичне поєднання з аквапонікою: одним із найбільш прогресивних рішень є пряма інтеграція рибницьких комплексів із промисловим рослинництвом (гідропонікою). У такій синергетичній системі відфільтрована вода, що містить розчинені макроелементи (зокрема, кінцевий продукт біофільтрації – нітрати), подається безпосередньо на кореневу систему рослин. Для салатної зелені, пряних трав, томатів чи огірків ці сполуки слугують ідеальним природним добривом. Рослини поглинають азотисті речовини, очищуючи воду, яка потім знову повертається до риби. Це робить виробничий комплекс практично безвідходним, агроекологічним кластером.

Стратегічні переваги для бізнесу. У підсумку, така радикальна мінімізація е. кологічного сліду (Ecological Footprint) не лише виконує благородну місію захисту навколишнього середовища, а й створює потужні прагматичні переваги для власників підприємства. Наявність замкнутого безвідхідного циклу кардинально спрощує та прискорює для компанії:

- Проходження державних та міжнародних екологічних аудитів;
- Отримання офіційних дозволів на спецводокористування та оцінку впливу на довкілля (ОВД);
- Процес сертифікації за суворими глобальними стандартами «зеленого» виробництва (такими як ASC, GlobalG.A.P. або ISO 14001).

Це відкриває рибному господарству прямий доступ до преміальних внутрішніх та експортних ринків збуту, підвищує капіталізацію бренду та робить проєкт привабливим для міжнародних екологічних гранті в та «зелених» інвестицій.

Біобезпека та ветеринарний контроль у закритих аквакультурних системах: штучно ізольоване середовище закритих аквакультурних систем (RAS) виступає як надійний, безкомпромісний біологічний бар’єр, який

кардинально знижує (а за належного менеджменту – повністю нівелює) ймовірність ураження вирощуваної риби небезпечними патогенними мікроорганізмами. У традиційному відкритому рибництві – такому як ставкові господарства, прибережні лимани або відкриті морські й річкові садки – промислова популяція гідробіонтів перебуває в постійному, неконтрольованому контакті із зовнішніми джерелами інфекцій. Натомість закритий технологічний контур дозволяє повністю розірвати природні шляхи передачі та вектори поширення небезпечних хвороб завдяки впровадженню комплексу превентивних захисних заходів.

Оскільки всі виробничі потужності RAS зазвичай розташовані всередині закритих, капітальних та захищених приміщень, у систему фізично не можуть потрапити дикі водоплавні птахи (головні господарі багатьох небезпечних гельмінтів), бродячі тварини, гризуни чи сміттєва дика риба. У відкритих водоймах саме ці представники дикої фауни є основними резервуарами та переносниками летальних вірусних інфекцій, бактеріальних спалахів та агресивних паразитарних інвазій. Глибоке технологічне знезараження та стерилізація проточної води: Уся свіжа вода, яка додається з природних джерел (свердловин чи поверхневих водозаборів) для підживлення системи та компенсації технологічних втрат, проходить обов'язкову багатоступеневу передочистку та дезінфекцію. Інтегровані блоки знезараження, що складаються з потужних ультрафіолетових (УФ) випромінювачів бактерицидного спектра та систем генерації озону (озонаторів), забезпечують деструкцію ДНК/РНК патогенів. Це дозволяє гарантовано знищувати до 99.9% хвороботворних мікроорганізмів, включаючи стійкі спори грибків, бактерії та віруси, роблячи вхідний потік води практично стерильним [22, 27, 49].

Суворий біологічний контроль, санітарні шлюзи та профілактичний карантин: Будь-яка нова партія рибоводного матеріалу (маточне поголів'я, запліднена ікра або живий мальок), що надходить ззовні, перед висадкою в загальні вирощувальні басейни проходить обов'язкове профілактичне карантинування в окремому, повністю ізольованому блоці. За період нормативного терміну спеціалісти проводять ветеринарне спостереження, ПЛР-

діагностику та, за потреби, лікувально-санітарні заходи. Крім того, на самому підприємстві діє режим суворого доступу: персонал та відвідувачі проходять через дезбар'єри (санітарні шлюзи) для дезінфекції взуття, рук та інвентарю, що виключає випадкове занесення інфекції людиною. Значення для стабільності бізнесу такий безкомпромісний рівень біологічного захисту мінімізує ризик раптового мору риби та гарантує збереження поголів'я на рівні 90–95% і вище на всіх етапах інкубації та вирощування. Підприємство отримує повну незалежність від епізоотичної ситуації в регіоні, уникає колосальних фінансових збитків від втрати біомаси та забезпечує стабільне, прогнозоване постачання здорової, безпечної та екологічно чистої продукції на ринок [9, 12].

Патогенетичний контроль та імунобіологічні аспекти аквакультури в замкнутому контурі диференціальна діагностика та пролонгований карантинний моніторинг: обов'язкова ізоляція інтродукованого біоматеріалу в автономних карантинних модулях дозволяє ветеринарним фахівцям своєчасно верифікувати латентні (приховані) форми патологій, хронічні бактеріоносійства та субклінічні стадії паразитарних інвазій. Застосування сучасних методів експрес-діагностики (зокрема, ПЛР-тестування та мікроскопії зябрових змивів) у цей період повністю нівелює епізоотичні ризики, виключаючи персистентне зараження та масову контамінацію всього промислового стада в основній вирощувальній зоні. Елімінація сезонної циклічності епізоотій через гомеостаз середовища: У природних екосистемах (ставках, садкових лініях) весняне танення снігу або екстремальна літня гіпертермія викликають суттєві гідрохімічні та температурні флуктуації. Такі коливання є потужними тригерами дистресу в гідробіонтів. Ендогенний стрес запускає каскад гормональних зсувів (зокрема, гіперсекрецію кортизолу), що призводить до глибокої імуносупресії – пригнічення неспецифічного та гуморального імунітету риби. У штучно стабілізованому біотопі RAS, завдяки перманентній підтримці оптимальних параметрів середовища, цей деструктивний чинник повністю елімінovано. Відсутність фізіологічного стресу запобігає сезонним інфекційним спалахам, підтримуючи природний резистентний статус організму на максимально високому рівні [19, 25, 30].

Фізіолого-економічний ефект та екологічна безпека кінцевого продукту абсолютна мінімізація інвазійного та інфекційного тиску за допомогою вищезазначених біологічних бар'єрів призводить до радикального зниження індексу мортальності (падежу) аквакультури на всіх етапах онтогенезу. З ветеринарно-санітарної практики підприємства практично повністю виключається необхідність терапевтичного або профілактичного застосування протимікробних засобів (антибіотиків), сульфаніламідів та агресивних хімічних дезінфектантів (таких як формалін, хлорамін чи сполуки міді), які мають високу токсичність та здатність до біоакумуляції. Для суб'єкта господарювання цей фактор забезпечує синергетичний ефект: зниження операційних витрат: оптимізуються та мінімізуються бюджетні асигнування на придбання дороговартісних ветеринарних препаратів, терапевтичних кормів та заходи з ліквідації наслідків епізоотій. Висока екологічна валентність продукту: Відсутність залишкових кількостей ксенобіотиків (антибіотиків та пестицидів) у м'язовій тканині гідробіонтів дозволяє отримати абсолютно безпечну, екологічно чисту харчову продукцію преміальної категорії. Така продукція повністю відповідає жорстким критеріям міжнародних стандартів токсикологічної та харчової безпеки (включаючи концепцію HACCP), забезпечуючи підприємству високу конкурентоспроможність та безперешкодний доступ до внутрішнього й світового ринків збуту рибної продукції високого цінового сегмента [10, 14, 36].

Популяційно-генетична та екосистемна ізоляція аквакультури в замкнутому технологічному контурі повне біотопічне та фізичне розмежування штучно вирощуваних гідробіонтів і природних диких популяцій у системах RAS є фундаментальним чинником підтримання стабільності екологічного балансу та збереження біорізноманіття. У традиційній аквакультурі – зокрема, за використання відкритих садкових ліній у континентальних чи морських акваторіях, а також руслових ставкових господарств – перманентно існує високий індекс ризику інтродукції (втечі) штучно утримуваної риби в природне середовище внаслідок гідрологічних аномалій (паводків, штормів) або механічного пошкодження огороджувальних конструкцій [22, 23].

Ексклюзивна локалізація виробничого циклу в герметичних закритих наземних комплексах повністю елімінує (нівелює) зазначену загрозу, забезпечуючи декілька критично важливих векторів екологічного захисту. У разі неконтрольованої емісії таких особин у природні біотопи виникає ризик їхньої гібридизації (схрещування) з дикими спорідненими таксонами. Подальша інтрогресія штучно селекціонованих алелей у дикий генофонд призводить до розмивання автентичної генетичної структури популяцій, зниження їхнього адаптивного потенціалу, втрати еволюційної пластичності та, як наслідок, суттєвого зменшення життєздатності й здатності до виживання в умовах природного добору [16, 18].

Нівелювання міжвидової конкуренції та мінімізація інвазивного ризику: багато об’єктів сучасного рибництва (наприклад, представники родів Oreochromis (тиляпія) чи Clarias (кларієвий сом))володіють високою екологічною валентністю та фенотиповою пластичністю. Потрапляючи в автохтонні (місцеві) екосистеми, ці експрес-види трансформуються в агресивних екологічних інвадентів. Маючи вищу швидкість росту та репродуктивний потенціал, вони успішно домінують у процесі міжвидової конкуренції за трофічні ресурси (кормову базу) та просторові екологічні ніші (місця нересту й нагулу). Це зумовлює прогресуюче витіснення та деградацію аборигенної іхтіофауни, аж до локального зникнення вразливих ендемічних видів. Блокування горизонтальної передачі та трансферу патогенів: Екологічна ізоляція закритих систем RAS функціонує за принципом двостороннього бар’єра. Вона не лише унеможливлює дифузію штамів хвороботворних мікроорганізмів з інтенсивного виробничого контуру у відкриті водойми, а й дзеркально захищає штучне стадо від екзогенного інфекційного тиску з боку дикої фауни. У відкритих типах господарств дикі гідробіонти виступають перманентними природними резервуарами вірусних, бактеріальних та паразитарних агентів. Закритий контур RAS повністю розриває вектори горизонтального трансферу збудників, блокуючи транскордонне поширення епізоотій в обох напрямках [12, 24, 30].

Епізоотологічна ізоляція, біоценотична стабільність та стратегічний синергізм технології RAS. Превенція антропонозного трансферу патогенів та епізоотичних колапсів: Двостороння ізоляція гідробіонтів у закритому контурі виконує критичну функцію стримування мікробіологічних загроз. У промислових умовах з високою щільністю посадки (stocking density) створюються специфічні селективні умови для прискореної еволюції мікроорганізмів. Це підвищує ризик виникнення емерджентних вірулентних штамів або мутацій патогенів, стійких до стандартних чинників контролю. Абсолютна герметичність систем RAS гарантує, що зазначені нозоформи та ізоляти ніколи не ексфільтруються у природні гідробіоценози. Це запобігає виникненню масштабних катастрофічних епізоотій серед диких популяцій гідробіонтів, які не мають специфічного імунітету до фермерських штамів.Консервація архітектури трофічних мереж та структурної цілісності біоценозів: Елімінація штучного пресингу з боку інтродукованих інвадентів є базовою умовою збереження нативної структури локальних екосистем [13, 16].

Стабільність динамічної рівноваги у ланках «хижак – жертва», функціонування бентосних та планктонних спільнот, а також репродуктивні цикли автохтонних екологічних груп відбуваються у межах природних флуктуацій. Відсутність конкурентного та хижацького тиску з боку втікачів з аквaферм дозволяє зберегти стабільність крихких природних біоценозів та запобігає деградації гідробіологічних комплексів. Висновок щодо біобезпеки: Враховуючи вищезазначене, повна ізоляція штучного біотопу від природного середовища позиціонує технологію RAS як єдину етично прийнятну, екологічно валідовану та безпечну методологію промислового культивування екзотичних таксонів, високоселекційних ліній та генетично модифікованих організмів (ГМО) у будь-якому географічному та кліматичному регіоні планети. Системна трансформація аквакультури: Технологічна конвергенція та стратегічні вектори розвитку. Інтеграція високотехнологічних рішень у сучасне рибництво є фундаментальним драйвером, що кардинально трансформує архітектуру галузі, забезпечуючи стійкий компроміс між макроекономічною

ефективністю виробництва та екологічним імперативом відповідального природокористування [34, 39].

Комплексна імплементація високих технологій в архітектуру рециркуляційних систем формує багатовекторну оптимізацію за такими ключовими детермінантами: парадигмальна революція в ресурсозбереженні та гідронімії. Багаторазова замкнута рециркуляція рідкої фази в поєднанні з інтелектуальними багатоступеневими комплексами деструктивно-сорбційного та мембранного очищення дозволяє знизити коефіцієнт дефіцитарного водоспоживання до мінімальних технологічних значень (компенсація лише евапорації та шламовидалення). Це повністю елімінує ризик сировинної вразливості виробництва, нівелюючи залежність підприємства від локального дефіциту чи якісної деградації первинних джерел водопостачання. Оптимізація нутрієнтного трансферу та максимізація біоконверсії корму: Інтеграція автоматизованих систем трофічного забезпечення, що функціонують на базі алгоритмів штучного інтелекту (AI) та прецизійних модулів комп'ютерного зору (Computer Vision), дозволяє здійснювати дискретне динамічне дозування екструдованих комбікормів із мікрограмовою точністю. Система аналізує поведінкові патерни (feeding behavior) та інтенсивність локомоторної активності гідробіонтів у реальному часі. Це повністю виключає явища гіперкорекції (перегодовування) та седиментації нез’їденого корму, що не лише мінімізує витрати найбільш капіталомісткої статті собівартості продукції (OPEX), а й запобігає додатковому біохімічному навантаженню на блоки механічної та біологічної фільтрації. Прецизійний гомеостатичний менеджмент онтогенезу та життєвого циклу: Безперервний цифровий моніторинг (24/7 real-time telemetry) фундаментальних гідрохімічних та фізичних констант екзогенного середовища (парціального тиску розчиненого кисню, температурних кривих, pH, редокс-потенціалу) повністю елімінує вплив кліматичної та сезонної циклічності [42, 45].

Стабілізація параметрів у межах фізіологічного оптимуму конкретного таксона нівелює розвиток загального адаптаційного синдрому (ендогенного стресу), стимулює неспецифічну резистентність організму та пролонговано

інтенсифікує анаболічні процеси. Як наслідок, забезпечується строго прогнозований, математично модельований та суттєво прискорений набір товарної маси [19, 23, 31].

Екологічна нейтральність та закрита циркулярна біоекономіка: Створення абсолютного біоінженерного бар'єра гарантує надійну ізоляцію навколишнього середовища від антропогенного тиску аквакультури. Даний контур повністю блокує ризики генетичної дифузії та міжвидової гібридизації з дикими популяціями, мінімізує транскордонний горизонтальний трансфер інфекційних агентів у природні гідробіоценози, а також забезпечує тотальний контроль над утилізацією органічного осаду. Органічний шлам дегідратується та залучається до циклів вторинної біоконверсії (виробництво органо-мінеральних комплексів, генерація метанвмісного біогазу, аквапонічні системи), трансформуючи лінійні відходи в ліквідні субстрати циркулярної економіки [18, 22].

Підсумовуючи викладене, слід констатувати, що впровадження інноваційних технологічних рішень системно трансформує аквакультуру з категорії ризикованого, екстенсивного промислу з високим рівнем стохастичної залежності від природно-кліматичних чинників у статус високотехнологічного, індустріального, верифікованого та екологічно безпечного виробництва. В умовах прогресуючих глобальних кліматичних флуктуацій, інтенсивної деградації біосфери та критичного антропогенного дефіциту прісної води, саме такий наукомісткий підхід є єдиним валідованим та безальтернативним вектором для забезпечення світової продовольчої безпеки (Global Food Security) та безперебійного постачання високоякісного, біологічно безпечного преміального протеїну тваринного походження на споживчий ринок.

РОЗДІЛ 2

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

Важливим елементом системи біологічної очистки води є біозавантаження, призначене для формування та підтримання прикріпленої мікробної біомаси. Його призначення полягає у створенні необхідної площі поверхні для закріплення мікроорганізмів, які беруть участь у перетворенні розчинених сполук азоту, насамперед амонійного азоту та нітритів.

У процесі експлуатації на поверхні біозавантаження формується біоплівка, до складу якої входять різні групи мікроорганізмів. Особливе значення мають нітрифікувальні бактерії, діяльність яких забезпечує послідовне окиснення амонійного азоту до нітритів, а надалі – до нітратів. Інтенсивність зазначених процесів визначається сукупністю фізико-хімічних і гідродинамічних чинників, зокрема температурою води, концентрацією розчиненого кисню, величиною pH, лужністю та характером водообміну.

Характеристику біозавантаження здійснювали за такими параметрами:

- тип і конструктивні особливості матеріалу;
- матеріал виготовлення;
- геометричні розміри окремих елементів;
- питома площа поверхні, доступна для формування біоплівки;
- загальний об'єм завантаження у біофільтрі;
- ступінь біологічного обростання поверхні;
- особливості гідравлічного режиму його експлуатації.

Для характеристики використаного матеріалу в роботі зазначали його комерційну або технічну назву, виробника та основні фізичні характеристики.

Експериментальні дослідження передбачали комплексне оцінювання функціонування біозавантаження в умовах експлуатації рециркуляційної аквакультурної системи. Основним критерієм оцінювання виступала здатність біологічного фільтра забезпечувати зниження концентрації токсичних азотовмісних сполук у воді за навантаження, характерного для вирощування кларієвого сома.

Для досягнення поставленої мети передбачалося виконання таких етапів: підготовчий етап. Вивчення конструкції системи біологічної очистки, визначення об’єму біофільтра, характеристик біозавантаження та умов його експлуатації; етап біологічного формування. Спостереження за розвитком мікробної біоплівки на поверхні завантаження та встановлення стабільності роботи біофільтра; гідрохімічний моніторинг. Визначення основних показників якості води до та після проходження біофільтра; оцінювання функціональної ефективності. Аналіз змін концентрації амонійного азоту, нітритів і нітратів, а також встановлення закономірностей їх трансформації; встановлення взаємозв’язку між характеристиками біозавантаження, параметрами водного середовища та умовами вирощування риб.

Для визначення ефективності біологічної очистки воду відбирали у двох контрольних точках: перед надходженням до біофільтра та після завершення процесу біологічної фільтрації. Такий підхід давав змогу оцінити зміни гідрохімічного складу води безпосередньо внаслідок функціонування біологічного завантаження. Оцінювання функціональної ефективності біозавантаження здійснювали на підставі результатів визначення основних фізико-хімічних показників води, які характеризують умови життєдіяльності риб та інтенсивність мікробіологічних процесів у біофільтрі.

Усі наукові положення, розрахунки, фактичні дані та висновки були перевірені автором роботи й сформульовані на основі власних досліджень, наукових джерел та результатів статистичної обробки [Положення про академічну доброчесність…, 2026].

У процесі підготовки кваліфікаційної роботи інструменти штучного інтелекту ChatGPT (OpenAI) використовували як допоміжний засіб для структуризації окремих фрагментів тексту, мовностилістичного редагування, узагальнення матеріалів і підготовки графічних елементів [Положення про використання штучного інтелекту…, 2026]. Відповідальність за достовірність фактичних даних, коректність розрахунків, наукову інтерпретацію результатів і сформульовані висновки несе автор кваліфікаційної роботи.

РОЗДІЛ 3

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

3.1. Трансформація аквакультури на засадах екологічної сталості

Впровадження інноваційних рециркуляційних систем водопостачання дозволяє кардинально трансформувати сучасне рибне господарство, перетворюючи його на екологічно нейтральне виробництво із замкнутим еко-циклом. Цей технологічний прорив став можливим завдяки глибокій локалізації та тотальному контролю над усіма процесами утворення, накопичення та переробки супутніх відходів аквакультури.

На відміну від традиційних ставкових, басейнових чи садкових господарств, які здійснюють масштабне скидання неочищених стічних вод із залишками продуктів життєдіяльності риби безпосередньо у відкриті природні водойми (що призводить до їх замулення, евтрофікації та цвітіння), замкнутий технологічний цикл повністю виключає ризик будь-якого неконтрольованого забруднення навколишнього середовища.

Сучасні високотехнологічні рішення в інженерії RAS забезпечують безкомпромісне та високоефективне керування екологічними ризиками за кількома стратегічними напрямками.

Прецизійне концентрування, сепарація та утилізація шраму (органічного осаду) Високотехнологічні механічні барабанні фільтри мікронового типу, гідроциклони та спеціалізовані гравітаційні відстійники безперервно вловлюють дрібні й великі тверді відходи, які утворюються всередині системи. До них належать: дисперсні фекальні маси гідробіонтів;; нез'їдені мікрочастинки дорогого екструдованого корму; злущений епітелій та біоорганічні сполуки.

Усі ці компоненти миттєво виводяться із загального потоку води та акумулюються у вигляді концентрованого осаду (шламу). Завдяки високому вмісту азоту, фосфору, калію та інших мікроелементів, цей концентрований шлам не утилізується як сміття, а стає цінною сировиною для суміжних

екологічних галузей. Його зневоднюють, піддають анаеробному зброджуванню або компостуванню, після чого успішно використовують як: високоякісні органічні добрива для сільського господарства; поживний субстрат для вирощування рослин у теплицях; біомасу для генерації біогазу на спеціальних енергетичних установках.

Запобігання біологічному забрудненню та збереження біорізноманіття

Традиційне садкове рибництво у відкритих акваторіях несе в собі прихований екологічний ризик: у разі пошкодження сіток штучно вирощена (часто генетично модифікована або інтродукована) риба масово втікає у дику природу. Це призводить до харчової конкуренції з місцевими видами, генетичного змішування та витіснення аборигенної фауни. Крім того, дикі популяції можуть заражатися хворобами від штучно ущільненої риби.

Повна ізоляція басейнів RAS всередині закритих капітальних приміщень створює абсолютний бар'єр. Будь-яка втеча аквакультури в природні екосистеми фізично неможлива, що гарантує збереження локального біорізноманіття та чистоту генофонду диких гідробіонтів.

3.2. Основні технологічні вузли та принципи роботи установок замкнутого водопостачання

Під рециркуляційними аквакультурними системами розуміють повну регенерацію та використання води будь-яку кількість разів для водопостачання басейнів (рибоводних ємностей). При цьому в RAS здійснюється: очищення води від забруднень у процесі вирощування риби (органіка); підтримка належного санітарного стану води на безпечному для риб рівні; відновлення як хімічного так і газового режиму води; забезпечується температура для отримання максимального ефекту від вирощування риби в RAS.

Головною умовою інтенсивного вирощування рибної продукції в установках замкнутого забезпечення (RAS) є оптимізація температурного режиму. Оптимальний термічний режим для росту осетрових риб знаходиться в межах від 20 до 22 градусів за Цельсієм. При виборі оптимальної температури для вирощування осетрових риб в системах із замкнутим водопостачанням

враховують забруднення води метаболітами риб, витрати кисню на насичення води, швидкість розпаду завислих речовин та умови існування мікроорганізмів у системі біологічного очищення води.

Необхідний набір обладнання для промислових установок із замкнутим циклом водозабезпечення повинен включати: – рибоводні басейни; – блок механічного очищення води; – біологічний фільтр; – блок водопідготовки (знезараження, регуляція температури, насичення води киснем). Загальні вимоги до рибоводних басейнів: внутрішня поверхня басейну не повинна виділяти у воду токсичні для культивованих об'єктів речовини і повинна бути достатньо гладкою, щоб не травмувати рибу. Басейн повинен бути доступним для очищення і стерилізації. Форми, габарити, проточність, спосіб регулювання рівня води, відловні пристосування повинні відповідати призначенню басейну.

Матеріал для виготовлення басейнів: бетон, склопластик, вініл-пласт, нео-ламбер – це матеріал із скловолокна і епоксидних смол з досить гладкою поверхнею, з якого легко виготовляють деталі рибоводних басейнів. Виділяють чотири типи рибоводних басейнів – прямокутні з пласким дном, прямокутні з похилим дном і лотком для змиву бруду, круглі або квадратні з закругленими кутами і практично пласким дном, круглі з конусним дном. Вибір форми басейну в основному пов'язаний з проблемою його самоочищення від фекалій і залишків корму. Найважче очищуються прямокутні басейни з пласким дном. Для того, щоб відбувалося самоочищення, необхідно, щоб у басейні було гладке дно, достатня швидкість течії води (вище 0,8 м/с).

Самоочищенню сприяє висока щільність посадки риби, оскільки вихрові течії, які утворюються при активному русі риби, перешкоджають осіданню бруду. Це стосується достатньо крупної риби, а при вирощувані личинок і мальків процес самоочищення послаблюється. Залежно від конструкції та матеріалу басейнів обирається і спосіб їх встановлення. Достатньо великі бетонні і металічні басейни проектуються і будуються для встановлення на опори, які мають фундамент. Невеликі пластикові і металічні басейни встановлюються на підлозі без спеціального фундаменту на власні опори або на спеціально виготовлені підставки. Невеликі склопластикові басейни можуть

бути прикопані в сипучий ґрунт. Водовипуск басейну – одна із найважливіших облаштувань басейну. Зазвичай місце водовипуску захищається нержавіючою сіткою. В невеликих і мілких басейнах очищення такої сітки відбувається вручну, у більш глибоких і більш об'ємних – використовують механічні засоби очищення або очищення струменем води під тиском.

У зв’язку з використанням високих щільностей посадки риби в RAS необхідно вирішити 2 основні проблеми – насичення води киснем для дихання риби, та видалення з басейнів продуктів життєдіяльності риб. Обидві ці проблеми вирішуються за рахунок постійної заміни води у басейні. Найбільше поширення в RAS отримали фізичні і біологічні методи очищення води.

Для механічного очищення води використовують горизонтальні чи вертикальні відстійники, в яких вода відстоюється і освітлюється, звільняючись від більшої частини твердих завислих частинок, а також фільтри грубого та тонкого очищення (гравійні, піщані). З цією метою також використовуються центрифуги і гідроциклони. Використання відстійників малоефективне через довготривалість процесу відстоювання.

На даний час найбільш ефективними для установок замкнутого водопостачання вважаються механічні самопромивні фільтри, а також фільтри з регенераційним завантаженням поліетиленових гранул. У самопромивних фільтрах осади вимиваються зворотнім потоком води в спеціальний промивний короб. Для забезпечення ефективної роботи фільтрів необхідно, щоб їх очищаюча поверхня була не менше площі рибоводних ємностей. Біологічне очищення води є обов'язковим процесом в RAS, без якого неможлива ефективна їх експлуатація. Вона базується на здатності мікро організмів розкладати органічні і неорганічні речовини, що накопичуються у воді при вирощувані риби, та спрямована на видалення із системи перш за все фосфору і азоту, які є основними джерелами забруднення. Біологічне очищення може проходити в спеціальних пристроях – біофільтрах, інтеграторах, аеротенках, а також біоставах з особливою мікрофлорою – активним мулом.

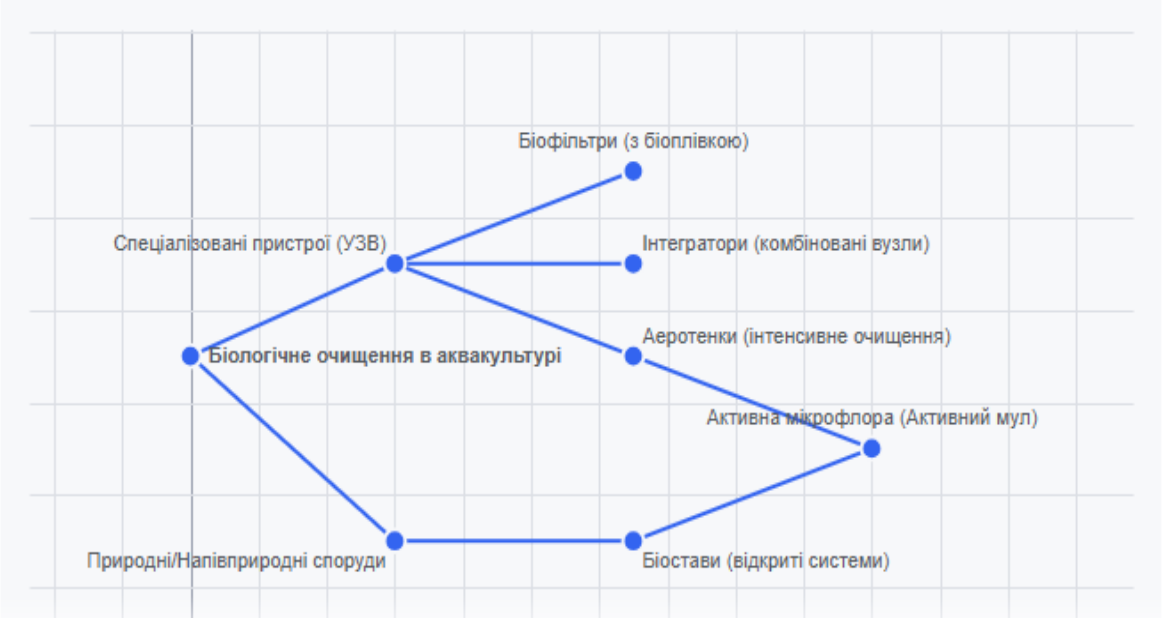

Рис. 1. Структура біологічного очищення води згенерована ШІ [Положення про використання штучного інтелекту…, 2026]

Організація біологічної деструкції органічних сполук у рибницьких господарствах із замкнутим або напівзамкнутим циклом може базуватися на використанні суспендованої (зваженої) біомаси. Ключовим елементом таких систем є активний мул – складна, штучно сформована екосистема, що складається з угруповань специфічних мікроорганізмів-деструкторів та нітрифікуючих бактерій. Ці мікроорганізми використовують розчинені органічні речовини та азотисті сполуки як джерело живлення та енергії, окиснюючи їх до безпечних мінеральних елементів. Для забезпечення життєдіяльності активного мулу та інтенсифікації процесів очищення застосовуються два основні типи інженерних споруд: аеротенки та інтегратори.

Аеротенки: конструкція, специфіка та експлуатаційні обмеження. Аеротенки це спеціалізовані технологічні ємності, що заповнені активним мулом та обов’язково обладнані потужними системами аерації або оксигенації для безперервного насичення водного середовища киснем. Кисень є критично важливим, оскільки процеси окиснення, що здійснюються мікрофлорою мулу, є суто аеробними. За конструктивними особливостями аеротенки поділяють на два види: Без наповнювача – класичні резервуари, де пластівці активного мулу перебувають у постійному зваженому стані за рахунок бурхливого

перемішування повітряними потоками. З наповнювачем: споруди, всередину яких завантажуються пористі або дрібнодисперсні матеріали (гравій, керамзит, керамічні чи скляні елементи, поліетиленові гранули). Наповнювач виконує роль субстрату, поєднуючи переваги вільно плаваючого мулу та фіксованої біоплівки, що дещо збільшує робочу площу контакту.

Техніко-економічні характеристики аеротенків:

Переваги: головними плюсами цих споруд є порівняно низька капітальна вартість обладнання, конструктивна простота та невибагливість в обслуговуванні. Продуктивність та габарити: аеротенки мають доволі низьку питому продуктивність на одиницю об'єму. Через це виникає потреба у значних виробничих площах: нормативне співвідношення об'єму рибоводних басейнів до об'єму аеротенків становить від 1:8 до 1:10. Тобто, на кожний кубічний метр рибоводної ємності потрібно передбачити від 8 до 10 кубічних метрів об'єму очисних споруд. Особливості гідротехнічної лінії: у парі з аеротенками для первинного очищення води зазвичай використовують не класичні механічні фільтри, а відстійники. Величезна кількість завислих частинок і пластівців активного мулу, що вимиваються з аеротенка, здатна майже миттєво забити сітки чи засипку будь-якого фільтра, катастрофічно знижуючи ефективність його роботи.

Енергетичні витрати: оскільки життєдіяльність бактерій мулу та ріст риби жорстко залежать від стабільного температурного режиму, необхідність підігріву таких великих об'ємів води (враховуючи буферну місткість самого аеротенка) призводить до суттєвого зростання витрат електроенергії або палива.

Інтегратори: технологія комбінованого очищення.

Інтегратор є більш компактним та технологічно витонченим рішенням. Конструктивно це вертикальна конічна ємність, яка завдяки своїй геометрії та особливій гідродинаміці поєднує два етапи очищення в одному корпусі: Нижня (конічна) частина: Тут штучно створюється і підтримується щільний киплячий або завислий шар активного мулу, через який знизу вгору під тиском проходить забруднена вода, проходячи глибоку біологічну деструкцію. Верхня

(розширена) частина: працює за принципом класичного відстійника. Швидкість висхідного потоку води тут падає, що дозволяє очищеній воді підніматися вище, а пластівцям мулу – відокремлюватися та опускатися назад у робочу зону .Експлуатаційні нюанси інтеграторів – ергономічність. Інтегратори значно ефективніші за об'ємом, ніж аеротенки. Співвідношення об'єму рибоводних ємностей до об'єму інтеграторів складає від 1:5 до 1:10.

Економічна перевага: при правильній роботі інтегратора відпадає пряма необхідність в окремому вузлі механічного очищення води, оскільки зважена ковдра мулу та верхня зона відстоювання самі уловлюють тверді забруднення. Критичний технологічний ризик: Головною складністю є потреба у філігранному, прецизійному підтриманні швидкості водообміну. Якщо швидкість потоку впаде нижче розрахункової, відбудеться злежування та замулювання активного мулу, що призведе до його загнивання (аноксії). Якщо ж швидкість перевищить ліміт – гідравлічний тиск просто винесе активний мул за межі зони відстоювання безпосередньо у басейни до риби, що спричинить замор та колапс системи.

Біофільтри останнім часом отримали найбільш широке застосування в системах біологічного очищення. Це ємності із наповнювачами різного типу – об'ємного, плаваючого, стільникового і трубчатого. Об'ємні і плаваючі листові наповнювачі застосовуються доволі рідко в промислових установках. Частіше використовують наповнювачі з поліетиленових гранул, які регенеруються, а також касетні і стільникові наповнювачі. Біофільтри мають продуктивність у 8-10 разів більшу, ніж аеротенки та інтегратори, але їх вартість у 5-10 разів вища. Співвідношення об'єму рибоводних ємностей і біофільтрів від 1:0,5 до 1:4. До недоліків біофільтрів, окрім їх високої вартості, відноситься необхідність використання в складі очисної споруди окремого біофільтру – денітрифікатора, в якому нітрати з очищуваної води відновлюються до вільного азоту. Проблема забезпечення киснем для дихання риб вирішується за рахунок подачі води, вже насиченої цим газом.

3.3. Обґрунтування вирощування кларієвого сома у самостійно спроєктованій рециркуляційній аквакультурній системі

На початку березня 2024 року було спроектовано домашнє RAS і для цього було придбано 2 рулони 30х1.5 м полі пропілена фірми «Rochling» для створення 2 басейнів та барабанного фільтру. Також знадобилися труби для циркуляції води, було використано ПВХ труби 110 та 50 діаметру. Для зварювання басейнів придбали дріт цієї ж фірми діаметром 4 мм і фен для зварювання пластику. Відповідно до нашого проекту ми нарізали деталі для зварювання басейнів. Для біологічної фільтрації зварили басейн овальної форми розміром 3.50х1.5х1.5 м.

Для міцності і надійності ми підкріпили сторони басейну вертикальними та горизонтальними жорсткостями також з поліпропілену, а поверх них 2 металевих обручі з кутника 40х40. Дно басейну зроблено під кутом до центру для кращого збору і зливу відстою. Всередині басейну було змонтовано кріплення для монтування аераторів, які були створені власноруч із аераційного шлангу 100 діаметру, всередині якого пластикова труба 50 діаметру в кількості 6 шт. по 1 м та вмонтованими на дно басейну. До них була під'єднана поліпропіленова труба для подачі кисню компресором «Hiblow HP120». Також був вмонтований насос для подачі води в басейн з рибою.

Для біологічного очищення води було засипано 1 $м^3$ плаваючої біозагрузки робочої поверхні 1000 m^2/m^3. Басейн для риби ми зробили 3 м в діаметрі. В центрі басейну була вмонтована 110 труба для забору брудної води на фільтр механічної очистки. Забір води здійснювався з верхнього і нижнього шару. Для подачі чистого кисню в басейн з рибами було вмонтовано дрібнодисперсний шланг довжиною 3 м і 16 мм в діаметрі (рисунок 3). Для механічної очистки води було зроблено фільтр барабанного типу. Він складається з корпусу, з барабану з сіткою 60 мкм, лотка для відтоку брудної води, промивочних форсунок, промивочного насоса, двигуна приводу барабану та автоматики.

В басейн для риби вода потрапляє на фільтр механічної очистки, вода проходить через сітку, брудні відходи залишаються на сітці, після чого за

допомогою промивочного насосу і форсунок вони змиваються в лоток для відтоку брудної води, яка потрапляє в каналізацію. А очищена вода потрапляє до басейну з біологічною фільтрацією і після проходження біологічної очистки вода потрапляє до басейну з рибою. Після запуску і перевірки системи в січні 2025 року було придбано 100 шт. лєнського осетра і 50 шт. руського осетра вагою 15 г.

Після вирівнювання температури риба була випущена в басейн. Після двох тижнів утримання риби якість води погіршилася і риба почала себе погано почувати і поступово відходила в незначній кількості. Для усунення подальшої загибелі риби було зупинено годівлю риб та добавлено 1 кг повареної солі на 1 м3 води. Після цього стало зрозуміло, що якість корму виявилась дуже низькою, що спричинило помутніння води і погане самопочуття риби.

Було взято відбір води для аналізу в лабораторії, а також кожного дня ми проводили аналіз води самостійно за допомогою спеціальних реактивів. Результати аналізів показували норму і було прийнято рішення про заміну корму на фірму «Coppens». Для підняття малька взяли корм фірми «Biomar». Через 10 днів вирощування риба мала середню вагу 2 г. Мальок форелі гарно себе почував і з якісним кормом добре набирав вагу.

До недоліків RAS можна віднести, мабуть, тільки одне: висока собівартість вирощуваної риби, найвища серед усіх форм рибництва. Інший шлях використання RAS – вирощування посадкового матеріалу різних видів риб, поставка їх у рибоводні господарства в ранні терміни. За рахунок збільшення періоду вирощування можливе одержання товарної продукції в ставкових господарствах за один рік.

Нами був розроблений комбінований модуль по очистці оборотної води. Обладнання мало такі технічні характеристики: 1. максимальна пропускна спроможність – 50 $м^3$ води за год, УФ стерилізатор, потужність – 275 Вт, Компресор, потужність – 385 Вт; продуктивність – 300 л/хв, барабанний фільтр з насосом для промивки, сітка механічної фільтрації 63 мікрони, 6. розпилювачі повітря 340 мм – 2 шт., 7. форсунки для промивки – 6 шт., 8. біозавантаження

1000 м2 / м3 – 600 л, 9. габарити ДШВ 2,28 / 0,83 / 1,3 м, 10. маса – 168 кг, 11. матеріал корпусу – поліетилен листовий.

Модульну систему очищення води виготовили на замовлення спеціалізованого виробника аквакультурного обладнання. Її конструкція передбачала використання гранульованих фільтрувальних матеріалів і мікросит, за допомогою яких здійснювалося видалення забруднювальних компонентів із води, що циркулювала в системі.

Зазначений фільтраційний модуль інтегрували у три установки замкнутого водопостачання (RAS), призначені для вирощування кларієвого сома (*Clarias gariepinus*). Його впровадження передбачало заміну традиційної системи водоочищення, сформованої з окремих фільтраційних пристроїв, з'єднаних між собою трубопроводами. Експериментальний комплекс включав три круглі рибоводні басейни діаметром 1,7 м та три вдосконалені модульні блоки очищення води.

Для забезпечення біологічної фільтрації до комбінованої системи внесли 600 л біозавантаження, попередньо сформованого та адаптованого до роботи в діючому біофільтрі. Це дало змогу використати вже сформовану мікробну біомасу для підтримання процесів біологічної трансформації азотовмісних сполук.

У кожен із трьох басейнів посадили по 200 екземплярів молоді кларієвого сома, загальна кількість риб становила 600 особин. Середня початкова маса одного екземпляра дорівнювала 100 г. Тривалість експерименту становила 90 діб. Протягом усього періоду вирощування риб годували повнораціонним комбікормом Grower-13EF виробництва Alltech Coppens, використовуючи фракції відповідно до маси риб. Контроль індивідуальної маси здійснювали з інтервалом 10 діб. Динаміку росту кларієвого сома представлено на рисунку 5.

Результати експерименту засвідчили позитивний вплив удосконаленої технології водоочищення на продуктивні показники вирощування кларієвого сома. Наприкінці дослідного періоду середня індивідуальна маса риб, які утримувалися за використання вдосконаленої системи фільтрації, становила 1050 ± 40 г. Цей показник перевищував відповідне значення контрольної групи

на 15,4 % за статистично достовірної різниці ($P \leq 0,05$). Таким чином, застосування модульної системи очищення води супроводжувалося підвищенням темпів росту риб порівняно з традиційною технологією водопідготовки.

Для поглибленого оцінювання функціональної ефективності модульної системи наприкінці експерименту дослідили інтенсивність біологічної фільтрації за максимального розрахункового навантаження на біофільтр. Добова кількість корму, внесеного до системи, становила 8 кг, що відповідало орієнтовному азотному навантаженню на рівні 400 г на добу. Інтенсивність водообміну в рибоводних басейнах становила 100 % за годину. За таких технологічних умов середня швидкість перетворення азоту біофільтром дорівнювала 16,5 г/год. Відсутність різкого зростання концентрації аміаку у воді свідчила про достатню інтенсивність нітрифікаційних процесів та здатність біологічного завантаження функціонувати за значного органічного й азотного навантаження.

Для визначення фактичної нітрифікаційної здатності біофільтра після завершення вирощування риб провели окремий експеримент без присутності гідробіонтів. З цією метою до води в басейнах вносили водний розчин аміаку концентрацією 25 %. Під час проведення досліду підтримували водообмін із частотою одного циклу на годину та температуру води 28 °С. Дослідження передбачало використання чотирьох різних концентрацій аміачного розчину. Кожен варіант досліду повторювали тричі, що забезпечувало можливість зіставлення отриманих результатів та зменшення впливу випадкових похибок на розрахункові показники.

Концентрація аміаку на рівні 0,25 мг/л не характеризується безпосередньою летальністю для африканського кларієвого сома, проте її тривале збереження у водному середовищі може негативно позначатися на фізіологічному стані та інтенсивності росту риб, особливо на ранніх етапах онтогенезу. Одним із технологічних чинників підвищення ефективності очищення може бути збільшення гідравлічного навантаження на біофільтр. У проведеному дослідженні цей показник становив лише 0,2 л/м²/хв. Водночас

його підвищення потребуватиме використання насосного обладнання з більшою продуктивністю, що необхідно враховувати під час оцінювання енергетичних витрат на експлуатацію системи.

Одним із перспективних напрямів удосконалення технологій очищення оборотної води в RAS виступає впровадження денітрифікаційних модулів. Зокрема, у Нідерландах застосовують спеціалізовані реактори денітрифікації, інтегровані в загальну систему водоочищення та обладнані внутрішнім джерелом органічного вуглецю. Прикладом такого технологічного підходу є підприємство з вирощування нільської тіляпії (Oreochromis niloticus) виробничою потужністю 600 т на рік, де інтенсивність водообміну становила близько 30 л на 1 кг використаного корму, що забезпечувало рівень рециркуляції води близько 99 % [27].

Зазначені технологічні показники стали можливими завдяки інтеграції реактора денітрифікації, у якому відбувалося відновлення нітратів (NO_3^-) до молекулярного азоту (N_2). У цьому процесі органічні сполуки використовуються мікроорганізмами як джерело вуглецю та електронів. Як зовнішнє джерело органічного вуглецю може застосовуватися метанол, тоді як до внутрішніх джерел належать залишки нез'їденого корму та органічні компоненти фекальних мас після попереднього видалення твердих частинок. Реалізація денітрифікації дає змогу зменшити споживання води, а також скоротити обсяги скидання нітратів та органічних забруднювачів у навколишнє середовище.

Економічна доцільність використання таких модулів пов’язана зі співвідношенням витрат на їх придбання й експлуатацію та потенційною економією коштів завдяки зменшенню обсягів водовідведення. Водночас застосування денітрифікаційних технологій дає змогу обмежити надходження надлишкового тепла та забруднювальних речовин у навколишнє середовище.

Використання денітрифікаційного модуля забезпечувало зниження потреби у тепловій енергії, воді та бікарбонатах. Разом із тим було відзначено певне збільшення споживання електроенергії, кисню, трудових ресурсів та інвестиційних вкладень. Незважаючи на це, сукупні виробничі витрати в

розрахунку на 1 кг отриманої риби були приблизно на 10 % нижчими порівняно з традиційною технологією. Інтеграція денітрифікації також сприяла скороченню обсягів скидання забруднювальних речовин: загального азоту – на 81 %, хімічного споживання кисню – на 59 %, загального споживання кисню – на 61 %, CO_2 – на 30 %, загальної кількості розчинених твердих речовин – на 58 %.

Застосування денітрифікаційних реакторів у складі RAS має низку технологічних переваг. Зокрема, така інтеграція забезпечує зменшення обсягів підживлювальної води, необхідної для контролю концентрації нітратів, обмеження скидання нітритів, а також потенційне скорочення енергетичних витрат на підтримання температурного режиму. Додатково біологічне перетворення органічних компонентів може сприяти зменшенню кількості твердих відходів, що надходять до барабанних фільтрів, та підвищенню лужності води, створюючи передумови для підтримання стабільнішої реакції середовища.

Попри наведені переваги, широке впровадження денітрифікаційних модулів у комерційне аквакультурне виробництво залишається обмеженим через значні капітальні витрати на придбання обладнання та його подальше обслуговування. Тому економічна ефективність використання таких технологічних рішень потребує подальшого обґрунтування з урахуванням специфіки конкретного господарства, його виробничої потужності та умов експлуатації.

Важливим аспектом застосування технологій із низьким рівнем водообміну є необхідність контролю накопичення розчинених продуктів метаболізму та інших потенційно несприятливих компонентів. Зменшення обсягів оновлення води може супроводжуватися поступовим накопиченням речовин, які утворюються внаслідок життєдіяльності риб, бактеріальної активності та розкладання кормових залишків. Серед таких компонентів розглядають кортизол та інші метаболіти, а також окремі мікроелементи й неорганічні сполуки.

За результатами біологічного тестування Interdonato (2012) встановлено, що за низької інтенсивності водообміну, яка становила 30 л на 1 кг корму, накопичення фосфатів, нітратів і важких металів, зокрема миш'яку та міді, потенційно може негативно впливати на ембріональний і личинковий розвиток коропа звичайного. Це свідчить про необхідність комплексного контролю хімічного складу води навіть за умови належного функціонування біологічного фільтра.

Наведені результати вказують на те, що ефективність функціонування RAS визначається не лише здатністю біофільтра трансформувати азотовмісні сполуки, а й загальним балансом розчинених речовин, інтенсивністю водообміну та стабільністю гідрохімічних характеристик середовища.

Перспективним напрямом подальших досліджень виступає встановлення оптимального гідравлічного навантаження на модульні системи очищення оборотної води з урахуванням їхньої нітрифікаційної продуктивності та енергетичних витрат. Важливим завданням також залишається економічне оцінювання технології вирощування риби в RAS шляхом зіставлення основних виробничих витрат із додатковими доходами, отриманими завдяки підвищенню щільності посадки та продуктивності рибоводних басейнів.

Результати проведених досліджень засвідчили перспективність використання вдосконалених модульних систем очищення оборотної води в установках замкнутого водопостачання за інтенсивного вирощування кларієвого сома (*Clarias gariepinus*). Комбінована система фільтрації, яка передбачала механічне, біологічне та ультрафіолетове очищення, забезпечувала видалення завислих забруднювальних частинок і створювала умови для інтенсивної трансформації амонійного азоту та нітритів.

Застосування вдосконаленого фільтраційного модуля позитивно позначилося на продуктивних показниках кларієвого сома. За результатами 90-добового вирощування середня індивідуальна маса риб становила 1050 ± 40 г, що на 15,4 % перевищувало відповідний показник контрольної групи за статистично достовірної різниці ($P \leq 0,05$).

Функціонування біологічного завантаження характеризувалося здатністю забезпечувати інтенсивну нітрифікацію за значного технологічного навантаження. За добового споживання 8 кг корму та розрахункового надходження близько 400 г азоту на добу середня швидкість його перетворення становила 16,5 г/год. Відсутність різкого підвищення концентрації аміаку свідчила про достатню функціональну спроможність біофільтра за досліджених умов експлуатації.

Подальше вдосконалення технології передбачає оптимізацію гідравлічного навантаження, початкове значення якого в досліджуваній системі становило 0,2 л/м²/хв, а також визначення економічної доцільності використання модульного обладнання з урахуванням енергоспоживання, продуктивності та щільності посадки риб.

Використання вдосконалених систем водоочищення створює технологічні передумови для підвищення ефективності інтенсивного вирощування кларієвого сома, раціональнішого використання водних ресурсів та зменшення екологічного навантаження аквакультурного виробництва.

ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ

1. Встановлено, що використання модульної системи водоочищення, яка поєднує механічну фільтрацію, біологічне очищення та ультрафіолетове знезараження, забезпечує комплексне очищення води в рециркуляційній аквакультурній системі за вирощування кларієвого сома *(Clarias gariepinus)*.

2. Застосування вдосконаленої системи водоочищення позитивно впливало на продуктивні показники риб. Наприкінці 90-добового періоду вирощування середня маса особин дослідної групи становила 1050 ± 40 г, що на 15,4 % перевищувало відповідний показник контрольної групи.

3. Функціонування біофільтра забезпечувало ефективне перетворення азотовмісних сполук. За встановленого навантаження його продуктивність за нітрифікацією становила 16,5 г азоту за годину, що супроводжувалося відсутністю різкого підвищення концентрації амонійних сполук у воді.

4. Подальше вдосконалення системи біологічного очищення доцільно спрямувати на оптимізацію гідравлічного навантаження, підвищення ефективності використання біофільтрувального матеріалу та оцінювання економічної доцільності експлуатації модульної конструкції за різної інтенсивності вирощування *Clarias gariepinus*.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Андрущенко А. (2023). Еволюційні імперативи формування і тенденцій розвитку економіки конкурентоспроможної аквакультури в умовах євроінтеграції та продовольчих викликів. *Науковий вісник Полісся.* № 2(25). С. 77–88. https://doi.org/10.25140/2410-9576-2022-2(25)-77-88

2. Головко А.А., Скиданов Ю.В. (2024). Технологія проектування рециркуляційної системи аквакультури – УЗВ (RAS) для форелівництва та осетрівництва в домашніх умовах. *Водні біоресурси та аквакультура.* № 2. С. 5–15. https://doi.org/10.32782/wba.2024.2.1

3. Гончарова О.В. (2020). Технологічні аспекти впровадження європейського досвіду «демо-аквaферми». *Водні біоресурси та аквакультура.* № 2. С. 91–100. https://doi.org/10.32851/wba.2020.2.9

4. Гончарова О.В., Кутіщев П.С. (2023). Аспекти формування потенціалу та розвитку української аквакультури на фоні євроінтегрування інноваційних рішень. *Водні біоресурси та аквакультура.* № 1. С. 73–82. https://doi.org/10.32851/wba.2023.1.6

5. Гриневич Н.Є. (2016). Особливості використання біофільтрів з різними типами наповнювача в установках замкнутого водопостачання в аквакультурі. *Науковий вісник ЛНУВМБ ім. С.З. Ґжицького.* Т. 18. № 3(70). С. 57–61. https://doi.org/10.15421/nvlvet7013

6. Гриневич Н.Є. (2017). Вміст нітрифікуючих мікроорганізмів у воді реактора біофільтра установки замкнутого водопостачання за використання різних типів наповнювача. *Науковий вісник ЛНУВМБ ім. С.З. Ґжицького.* Т. 19. № 82. С. 184–187.

7. Гриневич Н.Є., Димань Т.М, Хом’як О.А, Присяжнюк Н.М., Мазур Т.Г. (2020). Моніторинг вмісту нітрифікуючих мікроорганізмів на різних наповнювачах біофільтра *Водні біоресурси та аквакультура.* № 2. С. 59–76. https://doi.org/10.32851/wba.2020.2.10

8. Гриневич Н.Є., Димань Т.М., Мазур Т.Г., Слюсаренко А.О., Кухтин М.Д., Світельський М.М. Дослідження впливу різних типів наповнювачів

реактора біофільтра на процес формування нітрифікуючої мікрофлори в установках замкнутого водопостачання в індустріальних аквафермах. *Формування нової парадигми розвитку агропромислового сектору в XXI столітті: колективна монографія: у 2 ч. Ч 2.* Львів-Торунь, 2021. С. 478–508. https://doi.org/10.36059/978-966-397-240-4-17

9. Гриневич Н.Є., Осадча Ю.В. (2024). Моніторинг гідрохімічних показників рециркуляційної аквасистеми на ранніх стадіях онтогенезу *Acipenser ruthenus. Науковий вісник ЛНУВМБ ім. С.З. Ґжицького.* Т. 26. № 100. С. 75–82. https://doi.org/10.32718/nvlvet-a10011

10. Гриневич Н.Є., Семанюк Н.В., Світельський М.М., Трофимчук А.М., Хом'як О.А., Присяжнюк Н.М. (2021). Санітарно-мікробіологічні показники води рециркуляційної аквасистеми за вирощування *Acipenser ruhenus L. Водні біоресурси та аквакультура.* № 2. С. 51–63. https://doi.org/10.32851/wba.2021.2.5

11. Гриневич Н.Є., Трофимчук А.М., Світельський М.М., Слюсаренко А.О., Хом'як О.А., Присяжнюк Н.М., Жарчинська В.С., Осадча Ю.В., Іщук О.В. Біологічні основи рибного господарства: навчальний посібник. Біла Церква, 2023. 151 с.

12. Гриневич Н.Є., Хом'як О.А., Присяжнюк Н.М., Михальський О.Р. (2019). Аналіз гідротехнологічної складової індустріальних акваферм за замкнутого водопостачання. *Водні біоресурси та аквакультура.* № 2. С. 59–76. https://doi.org/10.32851/wba.2019.2.5

13. Дюдяєва О.А. (2023) Стан рибної галузі в світі та Україні: тенденції розвитку та глобальні виклики. *Водні біоресурси та аквакультура.* № 1. С. 24–40. https://doi.org/10.32851/wba.2023.1.2

14. Дюдяєва О.А., Рутта О.В. (2021). Додаткові вимоги до продукції аквакультури на зовнішніх ринках, у тому числі в торговельних мережах ЄС. *Водні біоресурси та аквакультура.* № 2. С. 64–76. https://doi.org/10.32851/wba.2021.2.6

15. Кваша С., Діброва А., Вдовенко Н. (2026). Банківські фінансові інновації в системі регулювання рибного господарства та

конкурентоспроможної аквакультури під впливом глобалізації і надзвичайних викликів. *Науковий вісник Полісся.* № 2(31). С. 312–321. https://doi.org/10.25140/2410-9576-2025-2(31)-312-321

16. Клименко М.О., Кононцев С.В., Гроховська Ю.Р., Прищепа А.М. (2026). Потенціал дефіциту поживних речовин за умов розвитку нитчастих водоростей в аквапоніці. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування.* № 4(108). С. 245–256. https://doi.org/10.31713/vs4202418

17. Кононцев С.В. (2016). Біотехнологія очищення води при вирощуванні кларієвого сома в УЗВ. *Вода і водоочисні технології. Науково-технічні вісті.* № 3(20). С. 57–64.

18. Кухарець С.М., Овдіюк В.М., Овдіюк О.М. (2022). Теорія та методологія аквакультурних систем і технологій. *Водні біоресурси та аквакультура.* № 2. С. 138–149. https://doi.org/10.32851/wba.2022.2.9

19. Лавренко С.О., Кутіщев П.С., Лавренко Н.М., Максимов М.В. (2019). Аквапоніка – розумне поєднання рибництва та рослинництва в контексті екологічної безпеки. *Водні біоресурси та аквакультура.* № 2. С. 91–106. https://doi.org/10.32851/wba.2019.2.7

20. Лавринюк О.О., Лісогурська Д. В., Вербельчук Т.В., Борщенко В.В. (2025). Виробництво та реалізація товарної продукції аквакультури в Україні. *Водні біоресурси та аквакультура.* № 1. С. 123–132. https://doi.org/10.32782/wba.2025.1.11

21. Овдіюк В.М. (2024). Зарубіжний досвід застосування фільтрів в аквакультурних системах: теорія та практика. *Таврійський науковий вісник.* № 138. С. 424–432. https://doi.org/10.32782/2226-0099.2024.138.51

22. Опарик М.М., Юрін О.А., Остапюк О.М., Россоха В.В., Гриневич Н.Є. (2024). Сталі практики ведення аквакультури, що відповідають сучасним екологічним та економічним вимогам. *Наукові пошуки молоді у XXI столітті» Екологізація виробництва та охорона природи як основа збалансованого розвитку (Біла Церква, 30 жовтня 2024 р.).* С. 12–13.

23. Охотник К.К., Сердюк С.М. (2026). Розвиток аквакультури в Україні в контексті сучасних викликів і принципів сталого розвитку. Розвиток тваринництва та аквакультури: інновації, виробництво, переробка. *Матеріали всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції (Дніпро, 15 травня).* С. 77–80.

24. Охріменко О.В., Кононенко І.С. (2025). Сучасні підходи до очищення води в рециркуляційних аквакультурних системах (огляд). *Рибогосподарська наука України.* № 3(73). С. 89–110. https://doi.org/10.61976/fsu2025.03.089

25. Положення про академічну доброчесність у Білоцерківському національному аграрному університеті. м. Біла Церква, 2026. 9 с. https://education.btsau.edu.ua/sites/default/files/DOC/pologenua/polog_academ_dobroch_2026.pdf

26. Положення про використання штучного інтелекту в Білоцерківському національному аграрному університеті. м. Біла Церква, 2026. 6 с.

27. Поручинська І.В., Поручинський В.І., Куцевич А.М. (2025). Сучасний стан аквакультури в Україні. *Водні біоресурси та аквакультура.* № 1. С. 143–151. https://doi.org/10.32782/wba.2025.1.13

28. Світельський М.М., Слюсар М.В., Іщук О.В., Мамченко В.Ю., Ковальчук І.І. (2026). Перспективність культивування прісноводних раків у рециркуляційній аквакультурі: продуктивні та фізіологічні критерії. *Сучасні проблеми теоретичної та практичної іхтіології: матеріали XVI іхтіологічної науково-практичної конференції (Дніпро, 29–30 вересня).* С. 219–222.

29. Семенов А.О., Семенова Н.В. (2025). Розробка електротехнічної системи УФ-дезінфекції води для рециркуляційних аквакультурних установок. *Вісник Приазовського державного технічного університету*. № 52. С. 132–139. https://doi.org/10.31498/2225-6733.52.2025.351015

30. Трофимчук А.М., Гриневич Н.Є., Романчук Б.А., Світельський М.М. (2021). Рибоводно-технологічне обґрунтування рециркуляційної аквасистеми для африканського кларієвого сома *Clarias gariepinus* (Burchell,

1822). *Науковий вісник ЛНУВМБ імені С.З. Ґжицького.* Т. 23. № 95. С. 29–37. https://doi.org/10.32718/nvlvet-a9502

31. Тютюнник Г.О. (2023). Організаційно-економічні заходи та пропозиції з використання рециркуляційних систем в галузі аквакультури в Україні. *Економічні інновації.* Т. 25. № 3(88). С. 243–260. https://doi.org/10.31520/ei.2023.25.3(88).243-260

32. Тютюнник Г.О. (2024). Нарощування інноваційного потенціалу сектора аквакультури: організаційно-економічні аспекти. *Галицький економічний вісник.* Т. 90. № 5. С. 56–67. https://doi.org/10.33108/galicianvisnyk_tntu2024.05.056

33. Филипчук В.Л., Бондар О.І., Курилюк М.С., Кривошей П.П., Курилюк О.М., Почтар О.В. (2016). Очищення води у фільтраційно-регенераційних біоплато. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування.* № 2(74). С. 193–204.

34. Шаблій Д.О. (2025). Вплив іонізованого аміаку на темпи зростання молоді африканського сома *(Clarias gariepinus)* в УЗВ. *Актуальні питання біотехнології, екології та природокористування: матеріали міжнародної наукової конференції (14–15 травня 2025 р.).* Харків: Державний біотехнологічний університет. С. 331–332.

35. Шарило Д.Ю., Коваленко В.О., Коваленко Б.Ю. (2019). Особливості використання біофільтрів з різними типами наповнювачів на етапі встановлення біологічної рівноваги в установках замкненого водозабезпечення. *Тваринництво та технології харчових продуктів.* Т. 10. № 2. С. 61–73. https://doi.org/10.31548/animal2019.02.061

36. Шарило Ю.Є., Вдовенко Н.М., Герасимчук В.Г., Поплавська О.С., Дмитришин Р.А., Маргасова В.Г., Коваленко Б.Ю. Рекомендації до розроблення проекту Комплексної програми розвитку сталої та конкурентоспроможної аквакультури на 2023–2030 роки. Київ : НУБіП України, 2021. 24 с.

37. Шарило Ю.Є., Вдовенко Н.М., Поплавська О.С., Дмитришин Р.А., Томілін О.О., Герасимчук В.В. Формування пропозиції на рибу та інші водні

біоресурси в рециркуляційних аквакультурних системах у контексті сталого розвитку сільських територій : посібник. Київ, НУБіП України, 2022. 96 с.

38. Шарило Ю.Є., Деренько О.О., Дюдяєва О.А. (2020). Використання водоростей виду *Chlorophyta* як біологічний метод очищення водойм. *Водні біоресурси та аквакультура.* № 1. С. 88–102. https://doi.org/10.32851/wba.2020.1.8

39. Ahmed M.M., Said M.M., Ali S.A. (2024). Comparative economics and operational performance of different biofilter media in aquaponic systems. *Egyptian Journal of Aquatic Biology and Fisheries,* 28(6), 1291–1311. https://doi.org/10.21608/ejabf.2024.396339

40. Almeida G.M.F., Mäkelä K., Laanto E., Pulkkinen J., Vielma J., Sundberg L.R. (2019). The fate of bacteriophages in recirculating aquaculture systems (RAS) – towards developing phage therapy for RAS. *Antibiotics,* 8(4), 192. https://doi.org/10.3390/antibiotics8040192

41. Asmal I. (2025). Hybrid smart bio-reactor and modular wetland system for blackwater treatment in tidal coastal settlements. *Results in Engineering,* 28, 108190. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.108190

42. Ben-Asher R., Gendel Y., Lahav O. (2024). Electrochemical applications in RAS: a review. *Reviews in Aquaculture,* 16(1), 86–105. https://doi.org/10.1111/raq.12822

43. Blancheton J.P., Attramadal K.J.K., Michaud L., d'Orbcastel E.R., Vadstein O. (2013). Insight into bacterial population in aquaculture systems and its implication. *Aquacultural engineering,* 53, 30–39. https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2012.11.009

44. Böpple H., Kymmell N.L.E., Slegers P.M., Breuhaus P., Kleinegris D.M.M. (2024). Water treatment of recirculating aquaculture system (RAS) effluent water through microalgal biofilms. *Algal Research,* 84, 103798 https://doi.org/10.1016/j.algal.2024.103798

45. Elmessery W.M., Abdallah S.E., Oraiath A.A.T., Espinosa V., Abuhussein M.F.A., Szűcs P., Elwakeel A.E. (2025). A deep deterministic policy gradient approach for optimizing feeding rates and water quality management in

recirculating aquaculture systems. *Aquaculture International,* 33, 253. https://doi.org/10.1007/s10499-025-01914-z

46. Jafari L., Montjouridès M.A., Hosfeld C.D., Attramadal K., Fivelstad S., Dahle H. (2024). Biofilter and degasser performance at different alkalinity levels in a brackish water pilot scale recirculating aquaculture system (RAS) for post-smolt Atlantic salmon. *Aquacultural Engineering,* 106, 102407. https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2024.102407

47. Kabir A., Shitu A., Ye Z., Li X., Ma H., Liu G., Liu, D. (2026). Sustainable Recirculating Aquaculture Systems (RAS): development and challenges. *Water,* 18(9), 1093. https://doi.org/10.3390/w18091093

48. Kolesnyk T., Maiboroda Kh. (2025). Efficiency of potassium sulphate application for growing Clarias gariepinus in an aquaponics system. *Scientific Reports of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine,* 21(2), 75–90. https://doi.org/10.31548/dopovidi/2.2025.75

49. Kravchenko A. (2026). Optimisation of biofiltration in closed aquatic systems for the sustainable development of aquaculture: Environmental aspects and technological innovations. *Scientific Reports of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine,* 22(4), 178–193. https://doi.org/10.31548/dopovidi/4.2026.178

50. Sharylo D., Kovalenko V., Matvieiev M., Kovalenko B. (2025). The use of biofilters with different types of fillers in recirculation aquatic system (RAS). *Fisheries & Aquatic Life,* 33(3), 143–152. https://doi.org/10.2478/aopf-2025-0013

51. Taufik M., Tuan Ismail T.I., Manan H., Ikhwanuddin M., Abdul Salam A.I. (2024). Synergistic effects of Recirculating Aquaculture System (RAS) with combination of clear water, probiotic and biofloc technology: a review. *Aquaculture and Fisheries,* 9(6), 883–892. https://doi.org/10.1016/j.aaf.2023.07.006

52. Udayakumar R., Kadirov I., Radjabova D., Fallah H.M., Tursunov M., Masalieva O. (2025). A system dynamics model for water quality management in recirculating aquaculture systems (RAS). *Natural and Engineering Sciences,* 10(2), 434–446. https://doi.org/10.28978/nesciences.1763840