



2025. Номер 12, С. 17 – 28.

Отримано: 18.09.2025 Прийнято: 02.10.2024 Опубліковано: 27.11.2025

DOI: 10.31890/vttp.2025.12.02

UDC 639.31:556.531:602.44-7

EFFICIENCY OF A MODULAR SYSTEM FOR TREATING RECYCLING WATER IN A CLOSED WATER SUPPLY PLANT

D.O. Shablii¹, I.V. Hnoievyyi¹, V.V. Kukoba², M.D. Bezuhlyi¹

¹*State Biotechnological University, Kharkiv, Ukraine*

²*Private Enterprise "Kukoba Volodymyr Vasyliovych", Kyiv region, Ukraine*

E-mail: rubovod@gmail.com

Annotation. Recirculating aquaculture systems (RAS) with modular recirculating water treatment systems are a promising solution for the development of aquaculture in Ukraine, including private farms. The production of high-quality fish products is achieved through the use of aquaculture production systems that have a minimal impact on the environment. RAS systems make it possible to reduce water consumption through its reuse, thereby promoting the intensive production of dietary fish without polluting the natural environment. Future improvements in RAS have two trends: (1) technical improvements in the water recirculation cycle and (2) in the filtration and inactivation of metabolic products. Both design directions contribute to improving the environmental performance of RAS. The review identifies key research priorities that will contribute to the future reduction of the environmental impact of RAS on the external environment. Possible new developments, such as an ultraviolet water sterilizer, could increase the efficiency of RAS and further the development of aquaculture. This article examines the effectiveness of such a system in removing mechanical and chemical contaminants from water, as well as the economic efficiency of using a modular purification system. Based on the research, it was found that modular purification systems have a high efficiency coefficient. Such purification systems remove up to 98% of all solid pollutants and up to 70% of ammonia and nitrites in a single pass through the filtration system.

Keywords: *aquaculture, modular cleaning systems, private fish farms, economic and environmental efficiency.*

ЕФЕКТИВНІСТЬ МОДУЛЬНОЇ СИСТЕМИ ОЧИЩЕННЯ ОБОРОТНОЇ ВОДИ В УСТАНОВЦІ ЗАМКНУТОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ

Д.О. Шаблій¹, І.В. Гноєвий¹, В.В. Кукоба², М.Д. Безуглий¹

¹Державний біотехнологічний університет, Харків, Україна,

²ТОВ «СІ ЕФ ПІ», Кіровоградська обл., Україна,

E-mail: rubovod@gmail.com

Анотація. Установки замкнутого водопостачання (УЗВ) з модульними системами очистки оборотної води є перспективним рішенням для розвитку аквакультури в Україні, в тому числі приватних господарств. Виробництво високоякісних рибних продуктів досягається за умови використання аквакультурних виробничих систем, які мінімально впливають на навколишнє середовище. УЗВ надають можливості зменшити споживання води за рахунок багаторазового її використання, тому сприяє інтенсивному виробництву дієтичної риби, одночасно не забруднюючи природне середовище. Майбутнє удосконалення УЗВ має дві тенденції: (1) технічні удосконалення у циклі рециркуляції води та (2) у фільтрації та інактивації продуктів метаболізму. Обидва конструктивні напрями сприяють покращенню екологічної характеристики УЗВ. В огляді визначено ключові пріоритети досліджень, які сприятимуть майбутньому зменшенню екологічного впливу УЗВ на зовнішнє середовище. Можливі нові авторські розробки, наприклад ультрафіолетовий стерилізатор води, що можуть підвищити ефективність роботи УЗВ та подальший розвиток аквакультури. У даній статті досліджено ефективність такої системи щодо видалення механічних та хімічних забруднень води, та економічна ефективність використання модульної системи її очистки. На основі досліджень було встановлено, що модульні системи очистки мають високий коефіцієнт ефективності. Такі системи очистки видаляють до 98% всіх твердих забруднюючих речовин та до 70% аміаку та нітритів за один прохід через систему фільтрації. Для приватних рибних господарств з продуктивністю від 5 до 20 тонн на рік економічна ефективність даних модульних систем очистки дозволяє знизити собівартість на 10-15%. Даний тип фільтраційного модуля простий в монтажу та підключенні, що особливо важливо для невеликих фермерських господарств.

Ключові слова: аквакультура, модульні системи очистки, приватні рибні господарства, економічна та екологічна ефективність.

Вступ. Сучасна українська аквакультура стикається з викликами, пов'язаними з російською агресією, обмеженням використання природних ресурсів, сезонністю та екологічними вимогами стосовно традиційних ставових методів вирощування промислових риб. Установки замкнутого водопостачання (рециркуляційні системи) дозволяють інтенсифікувати вирощування продукції аквакультури в контрольованих умовах, мінімізуючи використання води, площі та енергоресурсів. Модульні системи очистки рециркулюючої води, що включають в собі механічний фільтр, біологічний фільтр, ультрафіолетовий стерилізатор, систему аерації, є особливо актуальні для приватних рибних господарств, більшість яких не отримують інвестиції, тому вимагають рішень у питаннях високої вартості обладнання, раціонального використання площі, енергоємності, простоти встановлення та обслуговування обладнання.

Незважаючи на позитивні екологічні характеристики, а також поступове збільшення кількості країн у світі, що застосовують технологію УЗВ, їх внесок у виробництво продукції рибництва все ще значно поступається, якщо порівнювати з вирощування риби у морських садках, або ставках. Повільне впровадження технології УЗВ значно пов'язане з високими початковими капіталовкладеннями (Schneider et al., 2006). Для покриття інвестиційних витрат потрібна висока щільність посадки та безвідходне виробництво, бо є ризики

економічних втрат, пов'язаних з порушенням умов утримання (Martins et al., 2005). Однак, завдяки можливості підтримувати постійну якість води, УЗВ сприяють покращенню добробуту аквакультур (Roque d'Orbecastel et al., 2009).

Метою наших досліджень є оцінка ефективності модульних систем очищення оборотної води в установках замкнутого водопостачання (УЗВ) для приватних рибних господарств в Україні, з акцентом на економічну і технологічну ефективність та екологічну безпеку.

Основними завдання досліджень були:

1. Дослідити ефективність роботи системи очистки води в УЗВ за рахунок використання нового модуля.
2. Дослідити темпи росту кларієвого сома (*Clarias gariepinus*) в УЗВ за використання нового модуля очистки води.
3. Дослідити швидкість біофільтрації та нітрифікації води в УЗВ з новим модулем очистки води за ведення у середовище різних доз аміаку.

Огляд літератури. Установки замкнутого циклу водопостачання (УЗВ) – це автономні, інтенсивні аквакультурні системи, які використовують значну частину води багато разів. У цих системах вода з рибних резервуарів фільтрується та очищується перед повторним використанням, що зменшує кількість води, необхідної для розведення риби. Вода безперервно переробляється, а нова вода додається лише для компенсації випаровування, видалення відходів та розбризкування (Holan et al., 2020). УЗВ – це інтенсивний підхід до розведення риби, який використовує мінімальну площу землі та воду шляхом переробки та повторного використання води для вирощування після фільтрації (Ahmed & Turchini, 2021). Замість традиційного методу вирощування риби на відкритому повітрі у відкритих ставках та водоймах, за методики УЗВ риба вирощується в закритих резервуарах у контрольованих умовах (Cheruiyot & Adhiaya, 2023; Narsale et al., 2024). Компоненти системи видаляють або перетворюють утворені відходи, такі як тверді відходи, амонійні сполуки та вуглекислота, на нетоксичні продукти. Очищена вода потім насичується киснем і повертається в рибні резервуари (Wang et al., 2021). УЗВ може використовуватися за вирощування різних видів риб у високощільних умовах, досягаючи рівня виробництва до 500 тон на рік на тій самій площі, що й традиційні методи, що виробляють 2-10 тон продукції на гектар водної поверхні (Føre et al., 2018). Технологія базується на використанні механічних та біологічних фільтрів і може використовуватися для будь-яких видів, що вирощуються в аквакультурі (Zhang et al., 2011).

УЗВ можуть мати ключову роль у сталому розвитку аквакультури завдяки своїм численним перевагам, порівняно з традиційними технологіями вирощування риби у ставках (Naylor et al., 2000). УЗВ значно зменшують споживання води шляхом переробки та очищення води, зберігаючи цей цінний ресурс і мінімізуючи вплив аквакультури на навколишнє середовище. Завдяки рециркуляції води СЗВ мінімізують скидання відходів та використання хімікатів, захищаючи якість води та екосистеми. СЗВ можуть бути розташовані будь-де, включаючи міські райони, зменшуючи транспортні витрати та викиди вуглецю, пов'язані з традиційною аквакультурою. СЗВ підтримують високу якість води завдяки механічній та біологічній фільтрації, дезінфекції, забезпечуючи здорові водні екосистеми (Naylor et al., 2003). УЗВ усувають ризик передачі захворювань від фермерських риб до диких популяцій, забезпечуючи довгострокове здоров'я водних екосистем. УЗВ досягають вищої ефективності засвоєння їжі та темпів росту, порівняно з традиційними системами, що робить їх більш продуктивними та економічно ефективними. Установки УЗВ створюють робочі місця та розширюють доступ до ринку, а також задовольняють потреби населення до рибних продуктів (Badiola et al., 2012).

УЗВ працюють у приміщеннях, що дозволяє адаптуватись до сучасних кліматичних змін, які можуть суттєво вплинути на традиційну аквакультуру відкритої води. Системи УЗВ працюють за технологіями, які мінімізують використання антибіотиків та хімікатів, що можуть завдати шкоди водним екосистемам та здоров'ю людини. УЗВ можуть

інтегрувати у себе технологію аквапоніки, де азотні відходи життєдіяльності риби використовуються як сировина для виробництва овочів, підвищуючи загальну стійкість та прибутковість системи (Vasdravanidis et al., 2022). Загалом, УЗВ пропонують більш ефективний підхід до аквакультури, вирішуючи ключові проблеми, такі як збереження водних ресурсів, захист навколишнього середовища та боротьба з заразними хворобами, одночасно сприяючи інтенсифікації галузі рибництва та створенню робочих місць.

Класичні системи очистки води в УЗВ складаються з окремих механічних фільтрів, біологічних, систем знезараження води, систем аерації та інших фільтрів які з'єднані між собою за допомогою системи труб або каналів. Традиційно спроектовані УЗВ передбачають застосування кількох стадій фільтрації для очищення стічних вод і повторного використання в тій самій системі. Найпоширеніші комбінації включають первинне освітлення (механічне), біологічну та стадію стерилізації. Механічна стадія зазвичай видаляє тверді відходи, тоді як біологічна фільтрація видаляє розчинені відходи. Стерилізація згодом знижує концентрацію бактерій та патогенів у всій системі (Sauthier et al., 1998).

Системи рециркуляції води призначені для мінімізації або зменшення залежності від безперебійного постачання води для культивування гідробіонтів. Ці системи мають практичне застосування в комерційних аквакультурних маточниках, резервуарах для утримання та акваріумних системах, а також у невеликих проектах аквакультури. Існує безліч дизайнів систем рециркуляції, і більшість з них працюватиме ефективно, якщо вони забезпечують:

- 1) аерацію;
- 2) видалення завислих та твердих речовин;
- 3) біологічну фільтрацію для видалення відходів аміаку та фосфору;
- 4) буферизацію рН.

Розкладання органічної речовини та аміаку є біологічним процесом, який здійснюють бактерії в біофільтрі (Sharrer et al., 2009). Гетеротрофні бактерії окислюють органічну речовину, споживаючи кисень і виробляючи вуглекислий газ, аміак та осад. Нітрифікуючі бактерії перетворюють аміак на нітрит, а зрештою на нітрат. Ефективність біофільтрації залежить переважно від температури води в системі та рівня рН в системі. Щоб досягти прийнятної швидкості нітрифікації, температура води повинна підтримуватися в межах 10-35 °C (оптимально близько 30 °C), а рівні рН – між 7 та 8 (Ebeling et al., 2003).

Біофільтри зазвичай конструюються з використанням пластикових наповнювачів, що забезпечують велику площу поверхні на м³ біофільтра.

Осідаючі тверді речовини є найпростішими для видалення і повинні видалятися якомога швидше з ємності через седиментаційні резервуари (освітлювачі), механічні фільтри (гранульовані або сітчасті) або сепаратори вихрового потоку (Chen et al., 2021). Фізичні фільтри відфільтровують відносно великі грубі домішки, такі як фекалії, слиз та залишки корму. Хімічний фільтр відфільтровує частинки, що не можуть бути оброблені фізичними фільтрами. Механічна фільтрація вихідної води довела свою практичність для видалення зважених відходів. Майже всі рециркуляційні ферми фільтрують вихідну воду за допомогою мікросітки з фільтрувальною тканиною 40-100 мкм (Chen et al., 2021).

При розробці ефективної модульної системи очистки також було враховано досвід створення самих простих фільтрів для рециркуляційних зокрема системи для вирощування форелі (Davidson et al., 2019). У цій УЗВ цікаво саме те, як дослідники створили прототип УЗВ використовуючи надзвичайно обмежений бюджет.

В Індії було створено триступеневу систему фільтрації для прісноводної аквакультури або рециркуляційну аквакультурну систему для вирішення цієї проблеми. Прототип УЗВ був спроектований з урахуванням компактності, ефективності, довговічності та фінансових вимог. Основний басейн для культивування (головний рибний танк) мав місткість 1000 л і був зариблений 100 рибами. Щільність посадки була майже

вдвічі вища, ніж у біофлок-системах. Три стадії фільтрації – механічна, біологічна та ультрафіолетова. Риба, що використана для тестування прототипу – тилapia (*Tilapia*) (рис. 1) (Potnis et al., 2022).



Рис. 1. Прототип бюджетної системи очистки оборотної води для вирощування тилapia (Institute of Management, Пуна, Махараштра, Індія) (Potnis et al., 2022).

Тому вивчення процесів механічної, біологічної фільтрації для підтримки оптимальної якості води для росту риби вважаємо актуальним. Високий рівень контролю середовища дозволяє вирощувати широкий спектр видів, включаючи хижих риб, у місцях, віддалених від прибережних районів. Крім того, незважаючи на високі початкові інвестиції, УЗВ продемонстрували стабільну прибутковість та великі перспективи для удосконалення та використання.

Цей огляд має на меті забезпечити всебічне розуміння УЗВ як ефективного підходу до рибництва, який може допомогти задовольнити зростаючу потребу населення у виробництві високоякісних продуктів харчування, одночасно вирішуючи екологічні проблеми.

Матеріали та методи досліджень. Аналіз базується на власноруч розробленому фільтраційному модулі зі змінною швидкістю оновлення води в ФОП «Кукоба Володимир Васильович», що розташоване в Обухівському районі Київської області. У 2025 році проводили комплексний моніторинг якості води в УЗВ, який охоплював кілька ключових параметрів: рН, аміак, нітрити, нітрати та інші важливі показники, а також вирощували кларієвого сома у віці 50-140 діб, удосконаливши систему очищення води за допомоги нових трьох модулів, який вмонтували в 3 басейни у приватному господарстві ФОП «Кулик Вадим Адамович», що розташоване в м. Київ. За контроль використали кларієвого сома у віці 50-140 діб, який на першому етапі вирощували у цих басейнах, але використовували стандартне обладнання для очищення води – систему фільтрів, з'єднаних трубопроводами.

Рівень рН був стабільним і становив 7,7-7,9. Лужність – важливий параметр, який допомагає підтримувати стабільність рН, її вимірювали за показником карбонату кальцію (CaCO_3), що становив близько 120 мг/л. Лужність допомагала нейтралізувати кислотні сполуки та підтримувати оптимальний рівень рН.

У запропонованій системі УЗВ завислі речовини видаляли шляхом седиментації або просіювання. Видалення твердих відходів було критично важливим аспектом для підтримки якості води та здоров'я риб. Основними джерелами твердих відходів є не з'їдений корм та рибні фекалії. УЗВ зазвичай видаляло тверді відходи за допомогою комбінації седиментації та сітчастих фільтрів. Великі осідаючі частинки розміром понад 100 мікрон видаляли, дозволяючи воді сповільнитися у відстійнику, що призводило до осідання частинок. Цей процес можна було покращити, пропускаючи воду через труби або через водозливи у відстійнику. Однак самої седиментації недостатньо, оскільки вона видаляла лише частинки розміром понад 100 мікрон. Для досягнення адекватного видалення твердих речовин необхідно видаляти частинки розміром близько 50-75 мікрон. Обладнання, яке використовували для цього, були гранульовані фільтри та мікросита. Така система видаляла 80-90 % органічних речовин, а також до 90 % фосфору завдяки видаленню твердих відходів. Однак, пухко агрегований фекальний матеріал та нез'їдений корм мали тенденцію розпадатися на дрібніші частинки, що ускладнювало процес видалення.

Кисень додавали шляхом аерації, вуглекислий газ видаляли шляхом дегазації, а аміак здебільшого перетворювали на нітрати (NO_3) шляхом нітрифікації в аеробних біологічних фільтрах. У системі УЗВ максимально допустима концентрація NO_3 регулює зовнішній коефіцієнт водообміну. Високим концентраціям нітратів можна протидіяти шляхом денітрифікації.

Моніторинг якості води у досліджуваній системі мав вирішальне значення. Виявлення появи хімічного забруднення на ранній стадії дозволяло оперативно вживати контрзаходи для захисту риби.

Аналізи якості води проводили щодня по три рази за допомогою портативної тест лабораторії *JBL Combiset*. Додатково раз на місяць подавали зразки води на аналіз в сертифіковану лабораторію для контролю достовірності показників з портативної лабораторії.

Упродовж всього дослідження рівень основних показників майже не змінювався – різниця в показниках варіювала не більше 10 %. Середні дані якості води наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Показники якості води в УЗВ ($M \pm m$)

Показник	Час доби		
	8:00	13:00	22:00
NH_4	$0,05 \pm 0,005$	$0,1 \pm 0,001$	$0,15 \pm 0,005$
NO_2	$0,025 \pm 0,001$	$0,05 \pm 0,001$	$0,05 \pm 0,005$
NO_3	$80 \pm 1,1$	$40 \pm 0,4$	$40 \pm 0,4$
pH	$7,7 \pm 0,05$	$7,8 \pm 0,05$	$7,9 \pm 0,05$

Матеріалом для науково-господарських дослідів були особини кларієвого сома (*Clarias gariepinus*) 10-90 денного віку, яких утримували в УЗВ звичайного та удосконаленого зразка (табл. 2).

Таблиця 2

Схема науково-господарських дослідів

Група	Умови вирощування особин кларієвого сома (<i>C. gariepinus</i>)	
	Підготовчий період (5 діб)	Основний період (85 діб)
1–(контрольна), I етап дослідів	3 УЗВ стандартного зразка	3 УЗВ стандартного зразка
2–(дослідна), II етап дослідів	3 УЗВ з удосконаленим модулем по очистці оборотної води	3 УЗВ з удосконаленим модулем по очистці оборотної води

Масу тіла риб визначали шляхом зважування з точністю до 1 г.

Результати досліджень та їх обговорення. Нами був розроблений комбінований модуль по очистці оборотної води.

Обладнання (рис. 2) має такі технічні характеристики:

1. максимальна пропускна спроможність – 50 м³ води за год,
2. УФ стерилізатор, потужність – 275 Вт,
3. Компресор, потужність – 385 Вт; продуктивність – 300 л/хв,
4. барабанний фільтр з насосом для промивки,
5. 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

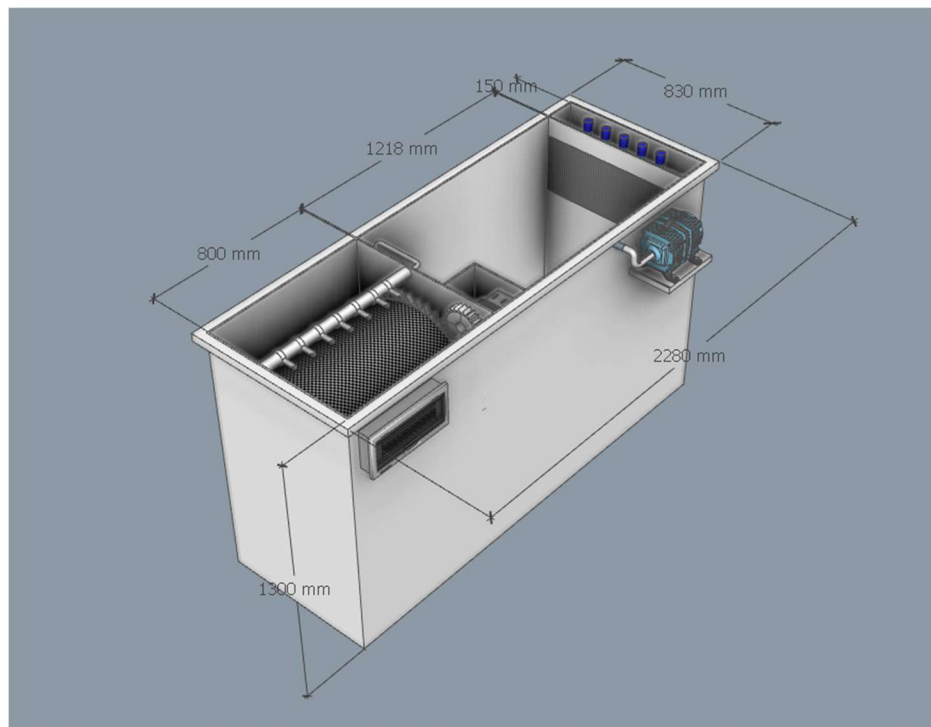


Рис. 2. Габаритні розміри модульної системи очистки оборотної води.

Модульна система була виготовлена на замовлення виробником, який виготовляє аквакультурне обладнання. Фільтрація води, що надходила у нову модульну систему, відбувалася за допомоги розташованих у ній гранульованих фільтрів та мікросит.

У рибному господарстві ФОП «Кулик Вадим Адамович» ця модульна система фільтрації була вмонтована в три УЗВ по вирощуванню кларієвого сома (*Clarias gariepinus*), замінивши стандартну систему фільтрації, виконану з окремих фільтрів, з'єднаних трубопроводами.

Комплекс систем УЗВ складався з трьох круглих басейнів діаметром 1,7 м та трьох удосконалених модульних блоків очистки води (рис. 3 і 4).

У комбіновану систему очистки було поміщено біозавантаження з працюючого біофільтру в кількості 600 л. У систему було заселено молодь кларієвого сома в кількості 600 шт. (по 200 особин на кожен басейн). Середня наважка риби становила 100 г. Дослідження проводилися впродовж 90 днів. Впродовж всього періоду досліджень сомів годували кормом *Grower-13EF Alltech Coppens* різної фракції. Заміри наважки проводилися кожні 10 днів. Темпи росту сомів наведені на рис. 5.



Рис. 3. Удосконалена модульна система очистки води в УЗВ.



Рис. 4. Басейни для вирощування кларієвого сома.

Удосконалення технології очищення води позитивно сказалося на швидкості росту кларієвих сомів. На 90 добу експерименту жива маса сомів у контрольній групі була в середньому на 140 г більшою, ніж в контролі. Соми за удосконаленої технології утримання досягли живої маси 1050 ± 40 г, що на 15,4 % перевищував цей показник у сомів контрольної групи ($P \leq 0,05$).

Щоб дослідити якість та швидкість очищення води модульною системою, в останні дні експерименту було досліджено швидкість біофільтрації, оскільки це було максимальне розрахункове навантаження на біофільтр. Добова норма годівлі складала 8 кг корму, що становило близько 400 г азотного навантаження на біофільтр на добу. Водобіг в басейнах проводився 100 % на годину. Тобто, біофільтр перетворював в середньому 16,5 г азоту за год. Різке підвищення рівню аміаку не спостерігали, що означало високу швидкість нітрифікації.

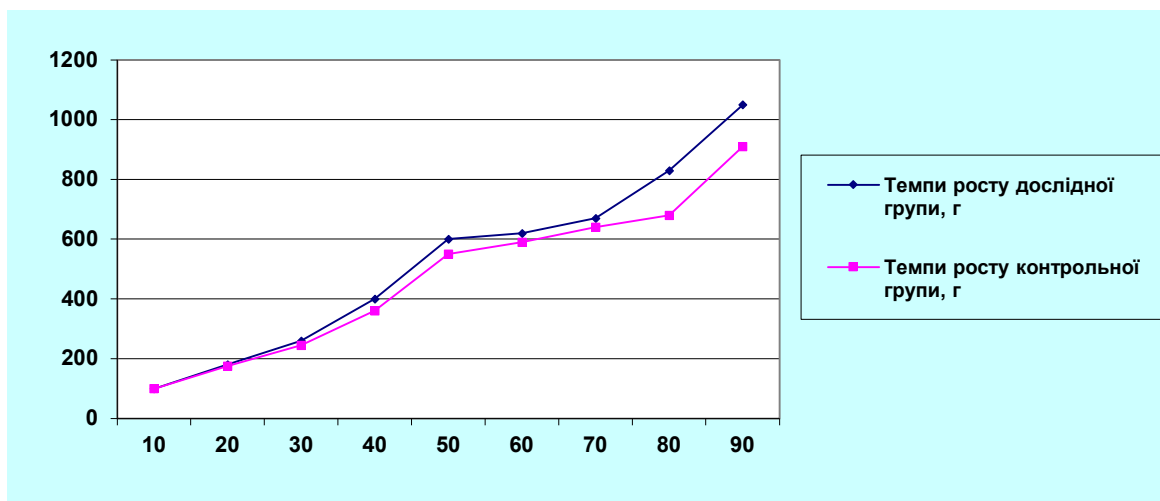


Рис. 5. Темпи росту кларієвого сома, маса/дні.

Після видалення риби провели дослідження по фактичній швидкості нітрифікації. У басейни без риби додавали водний аміак концентрацією 25 %. Водообмін відбувався один раз на годину та температури 28 °С. Було внесено чотири різні концентрації водного розчину аміаку. Кожна концентрація повторювалась тричі для отримання достовірних даних, виключаючи помилки в розрахунках. Дані досліді наведені в табл. 3.

Таблиця 3

Показники якості води за різних доз введення в УЗВ аміаку

Кількість внесеного аміаку, г (розчину мл)	концентрація аміаку в УЗВ на виході через годину, мг/л
10 (40)	0,05±0,0
15 (60)	0,05±0,0
25 (100)	0,15±0,0
35 (140)	0,25±0,01

Концентрація аміаку 0,25 мг/л не є летальною для африканського сома, але така концентрація може суттєво вплинути на темпи росту, особливо молоді. Цей показник можна суттєво покращити збільшивши гідравлічне навантаження. У нашому досліді воно становило всього 0,2 л/м.кв/хв. Проте збільшення гідравлічного навантаження потребує використання більш потужного насоса.

Проблеми нітрифікації води в УЗВ вирішують різними методами. В Нідерландах використовують модуль денітрифікації, але іншої конструкції – з внутрішнім джерелом вуглецю, що був інтегрований у звичайну систему УЗВ. На підприємстві з вирощування нільської тиляпії (*Oreochromis niloticus*) потужністю 600 тон/рік швидкість водообміну становила лише 30 л/кг корму, що відповідає 99 % рециркуляції (Martins et al., 2009). Така надзвичайно низька швидкість водообміну стала можливою завдяки включенню реактора денітрифікації в систему рекуперації NO₃ у газоподібний азот (N₂). Органічна речовина (зовнішнього походження, тобто метанол, але бажано внутрішнього походження, тобто не з'їдений корм та фекалії після видалення твердих речовин) окислюється шляхом відновлення NO₃. Порівняно зі звичайним УЗВ, зменшується споживання води, а також викиди NO₃ та органічних речовин. Витрати на встановлення та експлуатацію модуля денітрифікації переважаються зниженням витрат на скидання в місцеву каналізацію. Грунтові води не накопичуються у місці роботи цього підприємства і не відбувається їх нагрівання до 28 °С, щоб завдавати шкоди навколишньому середовищу.

Розглядаючи баланс розчинених речовин до та після впровадження денітрифікації на підприємстві потужністю 100 тон/рік, згаданий раніше (Martins et al. 2009), було проведено порівняння ефективності вирощування тиляпії потужністю 100 тон/рік з денітрифікацією та без неї за параметрами стійкості: ефективністю використання поживних

речовин (%), використанням ресурсів та скиданням відходів на кг виробленої риби (Martins et al., 2011). Система вирощування з денітрифікацією має значно нижчі потреби в теплі, воді та бікарбонаті. Хоча система вирощування з денітрифікацією має дещо вищі потреби в електроенергії, кисні та робочій силі (та інвестиціях), фактичні виробничі витрати на кг виловленої риби приблизно на 10 % нижчі, ніж для звичайної системи вирощування. Скидання відходів зменшується завдяки інтеграції денітрифікації на 81 % для азоту (N), на 59 % – для хімічного споживання кисню, на 61 % – для загального споживання кисню, на 30 % – для CO₂ та на 58 % – для загального споживання розчинених твердих речовин. Інтеграція модуля денітрифікації в звичайну систему реакторного очищення ґрунту дозволяє (1) зменшити об'єм підживлювальної води, необхідний для контролю NO₃, (2) зменшити скидання NO₂, (3) зменшити споживання енергії через виробництво тепла бактеріальною біомасою в модулі та зменшити об'єм води, яку необхідно нагрівати, (4) концентрувати та зменшити потік твердих речовин барабанного фільтру шляхом перетравлення твердих речовин *in situ*, та (5) підвищити лужність, що дозволяє проводити вирощування риби за нейтрального рН (Kim & Baе, 2000).

Незважаючи на значні переваги використання модуля денітрифікації води в УЗВ, його використання в комерційній аквакультурі все ще обмежене через високі затрати на придбання. Економічна доцільність широкого використання модуля денітрифікації в практиці УЗВ все ще потребує беззаперечних доказів.

Одним з основних внесків в екологічну стійкість інтеграції денітрифікації в УЗВ є зменшення використання води. Однак, невеликий коефіцієнт водообміну також може створювати проблеми. Як зазначає Areerachakul (2018), таке скорочення може призвести до накопичення факторів, що пригнічують ріст аквабіонтів, оскільки їх виділяють риби (кортизол), розмножуються бактерії та псується корм. Використовуючи біоаналіз, Interdonato (2012) показав, що за низького водообміну (30 л на кг корму) накопичення PO₄, NO₃ та важких металів – миш'яку та міді, ймовірно, погіршить ембріональний та личинковий розвиток коропа звичайного, і тому заслуговує на подальші дослідження. Також, Davidson et al. (2009) припустили негативний вплив зниження швидкості оновлення води на виживання у форелі, вирощеної в умовах УЗВ, головним чином через накопичення міді. Тим не менш, під час вирощування Good et al., (2009) не виявили впливу зниження швидкості оновлення води на показники росту риб, вирощених в умовах УЗВ, порівняно з повторним використанням проточних систем під час тривалих експериментів (близько 550 днів).

У майбутньому плануємо провести дослідження з метою виявити яке саме гідравлічне навантаження може використовуватися в модулях очистки оборотної води з максимальною ефективністю, дати економічну оцінку технології вирощування риби за використання УЗВ, порівнявши баланс між основними витратами та прибутком за рахунок підвищення щільності посадки риби.

Висновки.

Проведені дослідження підтвердили високу ефективність модульних систем очищення оборотної води в установках замкнутого водопостачання (УЗВ). Розроблений комбінований фільтраційний модуль, що включає механічну, біологічну та ультрафіолетову стадії очищення забезпечує ефективне видалення твердих забруднюючих речовин, аміаку і нітритів за одне коло, що дозволяє підтримувати стабільні параметри якості води навіть при інтенсивному навантаженні (до 400 г азоту на добу).

Кларієві соми (*Clarias gariepinus*), вирощені в УЗВ за використання удосконаленого модульного фільтра, мають перевагу у масі на 15,4 %, у порівнянні з аналогами, вирощеними в УЗВ із звичайним фільтруванням води. Тестування у господарстві з вирощування кларієвого сома продемонструвало високу швидкість нітрифікації (16,5 г азоту/год).

Подальші дослідження плануються з метою оптимізації гідравлічного навантаження (від 0,2 л/м²/хв) для підвищення щільності посадки та балансу між енерговитратами та продуктивністю, а також адаптації модулів для інших видів риби (наприклад, тиляпії). Впровадження таких систем сприятиме сталому розвитку української аквакультури, забезпечуючи екологічну безпеку та конкурентоспроможність приватних ферм на національному та міжнародному ринках.

References

- Ahmed, N., & Turchini, G. M. (2021). Recirculating aquaculture systems (RAS): Environmental solution and climate change adaptation. *Journal of Cleaner Production*, 297, 126604. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126604>.
- Areerachakul N. A. (2018). Biofilters in recirculation aquaculture system. In 96th The IRES International Conference, 16-19
- Badiola, M., Mendiola, D., & Bostock, J. (2012). Recirculating Aquaculture Systems (RAS) analysis: Main issues on management and future challenges. *Aquacultural Engineering*, 51, 26-35. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2012.07.004>.
- Chen, F., Du, Y., Qiu, T., Xu, Z., Zhou, L., Xu, J., Sun, M., Li, Y., & Sun, J. (2021). Design of an intelligent variable-flow recirculating aquaculture system based on machine learning methods. *Applied Sciences*, 11(14), 6546. <https://doi.org/10.3390/app11146546>.
- Chen, Z., Chang, Z., Qiao, L., Wang, J., Yang, L., Liu, Y., Song, X., & Li, J. (2021). Nitrogen removal performance and microbial diversity of bioreactor packed with cellulosic carriers in recirculating aquaculture system. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 157: Article 105157. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2020.105157>.
- Cheruiyot, J. K., & Adhiaya, M. (2023). Adoption of aquaculture technologies and management practices, challenges and productivity of fish-ponds in kakamega County, Kenya. *Asian Journal of Fisheries and Aquatic Research*, 22(1), 25-36. <https://doi.org/10.9734/ajfar/2023/v22i1563>.
- Davidson, J., Good, C., Welsh, C., Brazil, B., & Summerfelt, S. (2009). Heavy metal and waste metabolite accumulation and their potential effect on rainbow trout performance in a replicated water reuse system operated at low or high system flushing rates. *Aquaculture Engineering*, 41, 136-145. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2009.04.001>.
- Davidson, S., Summerfelt, K. K., & Schrader, C. (2019). Good Integrating activated sludge membrane biological reactors with freshwater RAS: preliminary evaluation of water use, water quality, and rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* performance. *Aquacultural Engineering*, 87, 102022. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2019.102022>
- Ebeling, J. M., Sibrell, P. L., Ogden, S., & Summerfelt, S. T. (2003). Evaluation of chemical coagulation-flocculation aids for the removal of phosphorus from recirculating aquaculture effluent. *Aquacultural Engineering*, 29, 23-42. [https://doi.org/10.1016/S0144-8609\(03\)00029-3](https://doi.org/10.1016/S0144-8609(03)00029-3)
- Føre, M., Frank, K., Norton, T., Svendsen, E., Alfredsen, J. A., Dempster, T., Eguiraun, H., Watson, W., Stahl, A., Sunde, L. M., & Schellewald, C. (2018). Precision fish farming: A new framework to improve production in aquaculture. *Biosystems Engineering*, 173, 176-93. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.10.014>.
- Good, C., Davidson, J., Welsh, C., Brazil, B., Snekvik, K., & Summerfelt, S. (2009). The impact of water exchange rate on the health and performance of rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* in water recirculation aquaculture systems. *Aquaculture*, 294, 80-85. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2009.05.014>
- Holan, A. B., Good, C., & Powell, M. D. (2020). Health management in recirculating aquaculture systems (RAS). *Aquaculture Health Management*. Academic Press, 281-318. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813359-0.00009-9>.
- Interdonato, F. (2012). Recirculating aquaculture system (RAS) biofilters: focusing on bacterial communities' complexity and activity (Doctoral dissertation, Università degli studi di Messina), 1-124.
- Kim, E. W., & Bae, J. H. (2000). Alkalinity requirements and the possibility of simultaneous heterotrophic denitrification during sulfur-utilizing autotrophic denitrification. *Water Science & Technology*, 42, 233-238. <https://doi.org/10.2166/wst.2000.0385>.
- Martins, C. I. M., Eding, E. H., Schneider, O., Rasmussen, R., Olesen, B., Plesner L., & Verreth, J. A. J.

- (2005). Recirculation aquaculture systems in Europe. Position Paper. *Aquaculture and Fisheries WIAS*.
- Martins, C. I. M., Eding, E. H., & Verreth, J. A. J. (2011). The effect of recirculating aquaculture systems on the concentration of heavy metals in culture water and tissues of Nile tilapia *Oreochromis niloticus*. *Food Chemistry*, 126(3), 1001-1005. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.11.108>.
- Martins, C. I. M., Ochola, D., Ende, S. S. W., Eding, E. H., & Verreth, J. A. J. (2009). Is growth retardation present in Nile tilapia *Oreochromis niloticus* cultured in low water exchange recirculating aquaculture systems? *Aquaculture*, 298, 43-50. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2009.09.030>.
- Narsale, S. A., Prakash, P., Mohale, H. P., Baraiya, R., Sheikh, S., Kirtikumar, P. B., Mansukhbhai, C. R., Kadam, R. V., & Tekam, I. (2024). Precision aquaculture: A way forward for sustainable agriculture. *Journal of Experimental Agriculture International*, 46(5), 83-97. <https://doi.org/10.9734/jeai/2024/v46i52360>.
- Naylor, R. L., Goldburg, R. J., Primavera, J. H., Kautsky, N., Beveridge, M. C. M., Clay, J., Folke, C., Lubchenco, J., Mooney, H., & Troell, M. (2000). Effect of aquaculture on world fish supplies. *Nature*, 405, 1017-1024. <https://doi.org/10.1038/35016500>.
- Naylor, S., Brisson, J., Labelle, M. A., Drizo, A., & Comeau, Y. (2003). Treatment of freshwater fish farm effluent using constructed wetlands: The role of plants and substrate. *Water Science & Technology*, 48, 215-222. <https://doi.org/10.2166/wst.2003.0324>.
- Potnis, A., Ghanekar, K., & Sinnarkar, A. (2022). Design and development of Recirculating Aquaculture System (RAS) for sustainable production and water quality research. *CC BY 4.0, October 2022*: 22. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2191606/v1>.
- Roque d'Orbcastel E., Person-Le-Ruyet, J., Le Bayon, N., & Blancheton J. P. (2009). Comparative growth and welfare in rainbow trout reared in re-circulating and flow through rearing systems. *Aquacultural Engineering*, 40, 79-86.
- Sauthier, N., Grasmick, A., & Blancheton, J. P. (1998). Biological denitrification applied to a marine closed aquaculture system. *Water Research*, 32, 1932-1938. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(97\)00406-5](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(97)00406-5).
- Schneider, O., Blancheton, J. P., Varadi, L., Eding, E. H., & Verreth, J. A. J. (2006). Cost price and production strategies in european recirculation systems. Linking Tradition & Technology Highest Quality for the Consumer, Firenze, Italy, WAS.
- Sharrer, M. J., Rishel, K., & Summerfelt, S. (2009). Evaluation of geotextile filtration applying coagulant and flocculant amendments for aquaculture biosolids dewatering and phosphorus removal. *Aquacultural Engineering*, 40, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2008.10.001>.
- Vasdravanidis, C., Albanou, M. V., Lattos, A., Papadopoulos, D. K., Chatzigeorgiou, I., Ravani, M., Liantas, G., Georgoulis, I., Feidantsis, K., Ntinis, G. K., & Giantsis, I. A. (2022). Aquaponics as a promising strategy to mitigate impacts of climate change on rainbow trout culture. *Animals*, 12(19), 2523. <https://doi.org/10.3390/ani12192523>.
- Wang, C., Li, Z., Wang, T., Xu, X., Zhang, X., & Li, D. (2021). Intelligent fish farm – the future of aquaculture. *Aquaculture International*, 1, 1-31. <https://doi.org/10.1007/s10499-021-00773-8>.
- Zhang, S. Y., Li G., Wu, H. B., Liu, X. G., Yao, Y. H., Tao, L., & Liu, H. (2011). An integrated recirculating aquaculture system (RAS) for land-based fish farming: The effects on water quality and fish production. *Aquacultural Engineering*, 45(3), 93-102. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2011.08.001>.