

УДК 628.16.067.1:639.3

DOI <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2024.138.51>

ЗАРУБІЖНИЙ ДОСВІД ЗАСТОСУВАННЯ ФІЛЬТРІВ В АКВАКУЛЬТУРНИХ СИСТЕМАХ: ТЕОРІЯ ТА ПРАКТИКА

Овдійук В.М. – завідувач навчальної лабораторії зоології,
біологічного моніторингу та охорони здоров'я,
Житомирський державний університет імені Івана Франка

Застосування фільтрів в аквакультурі є важливим елементом для створення оптимальних умов вирощування гідробіонтів у замкнутих системах, таких, як УЗВ (RAS). Вірно підібрані та обслуговувані фільтри гарантують безпечні умови для життєдіяльності гідробіонтів і відповідно високу якість продукції.

Визначена проблематика актуальності вирішення підвищення ККД механічного фільтра, при використанні в аквакультурі та забезпечення підвищення рівня економії і екологічності використання водних ресурсів. Встановлено, що вибір оптимального методу фільтрації залежить від конкретних умов аквакультурної системи, виду культивованих організмів та поставлених завдань.

Проведений ретроспективний аналіз зарубіжного досвіду (1974–1996 рр.) застосування різних типів фільтрів, зокрема розглянута методика та способи щодо видалення твердих речовин, до яких входять фекалії та залишки кормів в аквакультурних системах (гравітаційний метод, фільтрація або процеси просіювання), проаналізовано їх вплив на загальні показники ККД та енергоефективність в застосуванні на практиці.

Проведена систематизація методів та підходів, щодо способів фільтрації водного середовища аквакультурних систем, в частині виділення розмірів забруднюючих частинок, які видаляються в мікронах; загальне видалення забруднюючих частинок в % та їх застосування. Визначені переваги та недоліки методів фільтрації води в аквакультурних системах.

Розглянуто види фільтрів, які використовуються способом гравітаційного розділення, та виділено їх переваги і недоліки щодо застосування в системі замкнутого водопостачання. Досліджено види та конструктив механічних фільтрів, визначено вплив застосування таких методів фільтрації на стан та якість водного середовища аквакультури, а також визначено їх недоліки та переваги при застосуванні в системі УЗВ. Розглянуто конструктив роботи барабанного механічного фільтра, його переваги та недоліки. Досліджено метод фільтрації за допомогою процесу флоатації (пінно-фракційна фільтрація) та визначено переваги та недоліки застосування такого методу на практиці.

Ключові слова: УЗВ (RAS), методи фільтрації, аквакультура, види фільтрів, гідробіонти, фільтраційні системи.

Ovdiuk V.M. Foreign experience in the use of filters in aquaculture systems: theory and practice

The use of filters in aquaculture is an important element in creating optimal conditions for the cultivation of aquatic organisms in closed systems such as RAS. Correctly selected and maintained filters guarantee safe conditions for aquatic life and, consequently, high product quality.

The article identifies the urgency of solving the problem of increasing the efficiency of a mechanical filter when used in aquaculture and ensuring an increase in the level of economy and environmental friendliness of water resources use. It has been established that the choice of the optimal filtration method depends on the specific conditions of the aquaculture system, the type of cultivated organisms and the tasks set.

A retrospective analysis of foreign experience (1974–1996) in the use of various types of filters was carried out, in particular, the methods and techniques for removing solids, including feces and feed residues in aquaculture systems (gravity, filtration or sieving processes) were considered, and their impact on the overall efficiency and energy efficiency in practice was analyzed. Methods and approaches to the methods of filtration of the aquaculture water environment in terms of the

size of pollutant particles that are removed in microns; total removal of pollutant particles in % and their application are systematized. The advantages and disadvantages of water filtration methods in aquaculture systems are determined.

The types of filters used by the gravity separation method are considered, and their advantages and disadvantages for use in a closed water supply system are highlighted. The types and design of mechanical filters are investigated, and the influence of the use of such filtration methods on the state and quality of the aquaculture water environment is determined, as well as their disadvantages and advantages when used in the CCS system. The design of the drum mechanical filter, its advantages and disadvantages are considered. The method of filtration by means of the flotation process (froth fractional filtration) is investigated and the advantages and disadvantages of using this method in practice are determined.

Key words: CWSI, RAS, filtration methods, aquaculture, types of filters, aquatic organisms, filtration systems.

Постановка проблеми. Використання фільтрів в аквакультурі є одним з ключових елементів забезпечення оптимальних умов для вирощування гідробіонтів в замкнутих системах, зокрема в УЗВ (RAS). Варто зазначити, що система фільтрації дозволяє підтримувати високу якість води, шляхом видалення з неї шкідливих речовин, органічних відходів та надлишків поживних речовин. Так, використання фільтрів в аквакультурі є невід'ємною частиною успішного вирощування водних організмів. Отже, правильно підібрані і обслуговувані фільтри, зможуть забезпечити безпечні умови для життєдіяльності гідробіонтів і відповідно високу якість продукції на виході.

На сьогоднішній день майже у всіх рециркуляційних аквакультурних системах (RAS), які розраховані на інтенсивне вирощування гідробіонтів, використовують механічні фільтри для видалення твердих відходів. Використання механічного фільтра на першому етапі регенерації води пов'язане з потребою у швидкому затриманні і видаленні твердих та ще нерозчинених забруднюючих часток, які з часом можуть бути розчинені або подрібнені при механічних навантаженнях. Згідно з отриманими даними, які були встановлені експериментально, ККД барабанних фільтрів становить 41,7% [1, с. 4]. Таким чином, набуває актуальності проблема вирішення підвищення ККД механічного фільтра, при використанні в аквакультурі та забезпечення підвищення рівня в економії та екологічності використання водних ресурсів. Вибір оптимального методу фільтрації залежить від конкретних умов аквакультурної системи, виду культивованих організмів та поставлених завдань.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Проблематика застосування системи фільтрації в аквакультурних системах була та є досить актуальною серед зарубіжних вчених. Так, Ж. Аюсо-Віргілі, Л. Джафарі, Д. Ланде-Судалль, Н. Люммен займалися особливостями впливу фільтрації води на підвищення енергоефективності аквакультурних систем. Праці Р. П'єдрахіти, К. Фіцсіммонси та У. Закріці присвячені оцінці та вдосконаленню систем видалення твердих речовин в аквакультурі. Інженерним рішенням аквакультурних систем були присвячені праці Р. Ранджана, С. Кумар, Ч. Батіна, Р. Авадханула та інших. Проте, проблематика вибору рішення в системі фільтрації води, все більше є актуальною та потребує проведення подальших досліджень і на сьогодні.

Отже, зростаюча індустріалізація аквакультури потребує збалансованого підходу, який поєднує в собі підвищення ефективності виробництва з охороною навколишнього середовища та задоволенням глобальних потреб у продовольстві. Такий підхід, стимулює пошук інноваційних підходів, спрямованих на підвищення

ефективності виробництва, мінімізацію негативного впливу на довкілля та забезпечення сталого розвитку галузі.

Постановка завдання. Метою є дослідження та аналіз зарубіжного досвіду застосування різних типів фільтрів, їх переваги та недоліки, а також пошук способу, методу збільшення ККД фільтра; пошук технічних рішень, які дадуть змогу імплементувати завдання з очистки води в аквакультури та підвищити рівень якості води для розведення та утримування гідробіонтів.

Виклад основного матеріалу. На сьогодні, для видалення твердих речовин, до яких входять фекалії та нез'їдені залишки кормів в аквакультури (аквакультурних системах), застосовуються різноманітні методи. Варто зазначити, що органічні тверді речовини, розкладаючись, споживають кисень, виробляють аміак і чинять велике окислювальне навантаження на біологічні фільтри. Зокрема, Liao та Mayo (1974) підрахували, що 70% $\text{NH}_3\text{-N}$ в стічних водах риб, пов'язано з твердими органічними речовинами [8, с. 194–247].

Так, видалення твердих речовин (чи часток) здійснюється гравітаційними методами, фільтрацією або процесами просіювання (Chen et al., 1994; Wheaton, 1977). Гравітаційний метод можна розділити на два варіанти: перший – це видалення забруднюючих часток, які є більш щільні ніж вода і для фільтрації можуть бути використані відстійники, гідроциклони, центрифуги; другий – для частинок які менш щільні за воду, використовувати флотацію розчиненого повітря. Виділяють також, ще декілька видів механічної фільтрації, включаючи барабанні фільтри, дискові фільтри, стрічкові фільтри тощо. В більшості випадків, для очищення води на фермах використовують фільтри, які в якості фільтруючого елемента, використовують мікросито, де розмір вічка залежить від проектного розміру забруднюючих частинок, які продукуються гідробіонтами [2, с. 2].

Варто зазначити, що використовують і системи фільтрації, які базуються на фільтрації через шари зернистих середовищ. Зокрема, до них відноситься методи фільтрування через пісочну основу, шар з пластикових кульок, варіації комбінація з різних сипучих матеріалів, із застосуванням низького швидкісного режиму та тиску, безперервної промивки тощо [2, с. 5]. Таким чином, методи фільтрації визначаються з властивостей та розмірів забруднюючих частинок, які потрібно видалити з водного середовища аквакультурної системи.

Водночас, на сьогодні представлений широкий перелік методів та підходів, щодо способів фільтрації води від твердих часток в аквакультури (табл. 1).

Отже, можна стверджувати, що на сьогоднішній день в розпорядженні інженерів є різні типи фільтрів механічної очистки, які можуть бути використані в аквакультури з різними властивостями, степенями очистки, використовуватись, як окремо так і доповнювати один одного в залежності від проектних потреб для утримування певного виду гідробіонтів.

Так, до методів, які використовуються для видалення забруднюючих частинок в аквакультури, відносять спосіб гравітаційної седиментації, фільтрацію та флотацію. Варто зазначити, що флотація іноді розглядається, як ще один вид гравітаційного розділення.

Розглянемо детальніше спосіб гравітаційного розділення (рис. 1). Так, спосіб гравітаційною седиментації ґрунтується на принципі швидкості процесу седиментації та осідання. До процесів цієї категорії відносяться: відстійники трубчасті відстійники та гідроциклони.

Таблиця 1

**Методи та підходи, щодо способів фільтрації водного середовища
аквакультурних систем**

№ п/п	Види фільтрів	Розмір забруднюючих частинок, які видаляються, мкр	Загальне видалення забруднюючих частинок, %	Застосування
1.	Седиментація (відстійник)	>100	40-60	Ставкова аквакультура, УЗВ
2.	Барабанний фільтр	>90	10-25	УЗВ з інтенсивним вищупуванням
3.	Барабанний фільтр	>60	40	УЗВ з інтенсивним вищупуванням
4.	Пісчаний фільтр	>20	50-92	Ставкова аквакультура, УЗВ
5.	Пісчаний фільтр під тиском	>20	67-91	УЗВ з інтенсивним вищупуванням
6.	Фільтр вихревої сепарації	1-75	37,1	Ставкова аквакультура, УЗВ
7.	Метод фільтрації пінно-фракційний	<30	<50	УЗВ в більшості з використанням води підвищеної соленості
8.	Фільтрація методом озонування	<30	-	УЗВ з інтенсивним вищупуванням цінних порід гідробіонтів
9.	Фільтрування через мембрану	>0,05	>99,65	Питна вода

Джерело: адаптовано та доповнено автором [4, с. 21].

Застосування такого методу, зарекомендувало себе в якості відносно простої експлуатації. Споруди та обладнання, які використовуються, не потребують кваліфікованого персоналу та великих енергозатрат. Також, можуть бути використані в якості доагрегування в нові та існуючі об'єкти в аквакультурі. Проте, даний метод гравітаційної седиментації має і деякі недоліки. Так, можна зазначити, що згідно з проведеними попередніми дослідженням, розміри забруднюючих часток не можуть бути меншими за 100 мкр., в класичному варіанті займають велику площу і потребують умовно велику кількість води [4, с. 4]. Зокрема, одним з важливих недоліків седиментації є те, що осілі брудні частинки знаходяться в робочому середовищі аквакультури, які можуть частково розчинятись, підвищуючи рівень забруднень, які знаходяться в розчиненому стані і створюють додатковий тиск на послідувачі системи очищення такі, як біофільтр, та потребують збільшення подачі кисню. Трубчасті фільтри потребують уваги до поверхонь, завдяки яким проходить процес осідання і відповідно виникає потреба в додатковій очистці. Саме такі типи таких фільтрів не рекомендують до використання в системі УЗВ.

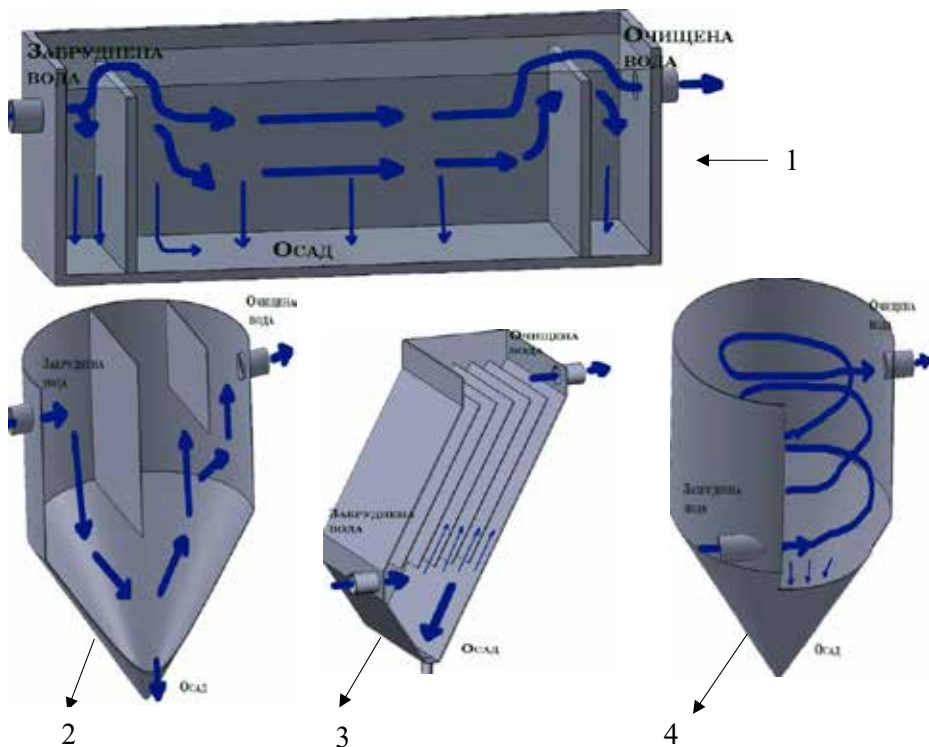


Рис. 1. Види фільтрів, які використовуються в способі гравітаційного розділення
1. відстійник, 2. відстійник конусного типу, 3. трубчастий відстійник, 4. вихровий відстійник (гідроциклон).

Джерело: доповнено автором [3–4, 8]

Розглянемо спосіб фільтрації води, де застосовується метод піщаної фільтрації. Так, перші згадки про використання піщаних фільтрів з'явилися у методі очистки води в працях Джона Гібба в Пейслі в 1804 році [6, с. 3]. Використання фільтрування води в аквакультурі через зернистий шар, також себе досить вдало зарекомендував. В якості зернистого шару, в більшості випадків використовують пісок зернистістю 1,2–2 мм [5, с. 5].

Розглянемо конструктив піщаних фільтрів. Так, виділяють три типи піщаних фільтрів: фільтри з висхідним потоком, повільні піщані фільтри та швидкі піщані фільтри. Використання такого типу фільтру доцільно при вирощуванні гідробіонтів, які потребують підвищених нормативів до чистоти води. Швидкі піщані фільтри найбільш поширені в використанні в установках замкнутого водопостачання. Головними перевагами даного виду фільтра є фільтрація частинок до 20 мкр. Також в піщаному фільтрі відбуваються процеси денітрифікації. Використання піщаного фільтру з рухомим шаром, досліджувалось для використання в очисних спорудах Гардермуен (GRA), Ессхайм (Норвегія), які повинні були знижувати загальний фосфор Р стічних вод до рівня нижче 0,1 мг/л у середньому на рік. Так, швидкість гідравлічної фільтрації, під час випробувань, коливалася від 4,2 до 7,1 м/год. Дослід довів, що рівень фільтрації успішно досягається [6, с. 18]. Отже,

можна зазначити, що до переваг піщаного фільтра варто віднести: здатність фільтрувати частинки до 20 мкр.; частково виконується роль біофільтра; витримується різниця тиску в 2–5 атмосфер. До недоліків можна віднести енергозалежність, так як виникає необхідність використання різниці тисків для подолання опору через проходження шару піску, витрати води при промиванні фільтруючого матеріалу, зменшення швидкості проходження води через фільтр в зв'язку з забрудненням фільтруючого шару.

На сьогодні, найпоширенішими фільтрами, які використовуються в рециркуляційних аквакультурних системах, де застосовується інтенсивний метод вирощування гідробіонтів, є механічні фільтри. Такі фільтри також можна розділити на три види: барабанний, дисковий, стрічковий.

Застосування цих фільтрів обґрунтовано використанням, в першу чергу, після басейнів з гідробіонтами, що дає можливість забезпечення найшвидшого видалення забруднюючих часточок, таких, як фекалії риб, залишки корму, біоплівка. Швидкість видалення забруднюючих часток обумовлена потребою щодо недопущенню розчинення їх у воді. Рівень фільтрації в механічних фільтрах в більшості випадків, розрахований на затримання забруднюючих частинок розміром до 80 мкр. (ККД барабанних фільтрів становить 41,7%) [1, с. 4].

Принцип роботи барабанного механічного фільтра подано на рис. 2.

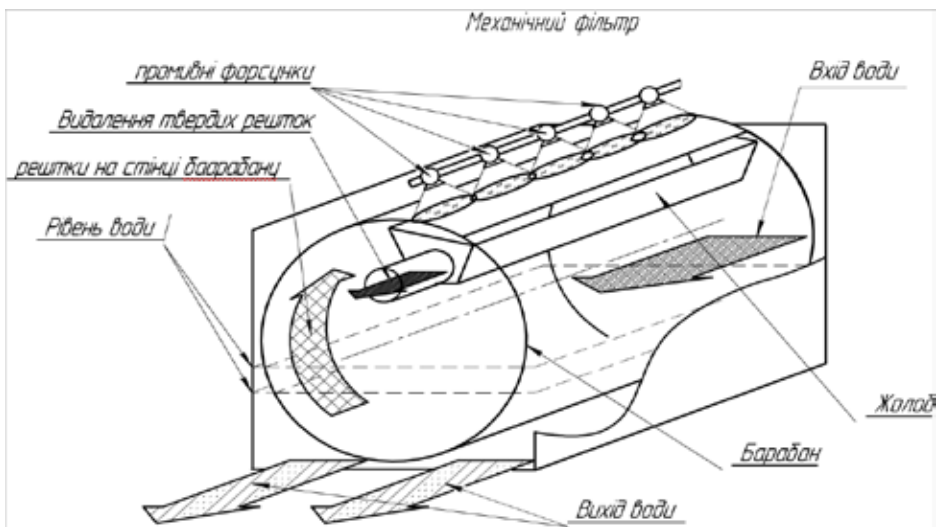


Рис. 2. Конструктив барабанного механічного фільтра

Джерело: адаптовано та узагальнено автором [1–6]

Процес роботи механічного фільтру в рециркуляційних аквакультурних системах (RAS), передбачає фільтрування води за допомогою сита з градацією від 10 мікрон до 100 мікрон. Фільтруюче сито закріплене на барабані, який обертається періодично, або на постійній основі. Барабан встановлюється горизонтально до поверхні. При проходженні забрудненої води через фільтр по осі барабану, тверді частинки, які мають більший розмір ніж вічко сита, затримуються на ньому. При певній кількості забруднюючих речовин, коли гідравлічний тиск в барабані

зростає і піднімається рівень води, спрацьовує датчик рівня води і включається зворотна промивка фільтруючого елементу. Забруднюючі речовини, які змиваються, потрапляють у прийомний жолоб, по якому видаляються самопливом на утилізацію чи змиваються у каналізаційну систему. Деякі барабанні фільтри використовують всмоктування повітря для видалення твердих частинок з поверхні решіток. Зазначені вакуумні барабанні фільтри зазвичай працюють з потоком, що проходить ззовні в середину барабана [2, с. 82–83]. Такі фільтри найкраще себе зарекомендували в хімічній галузі.

До переваг механічних фільтрів можна віднести очищення води від порівняно великих забруднюючих частинок таких, як залишки живого корму у вигляді личинок, для інших типів фільтрів це б було неможливо зробити. Тверді частинки видаляються з води відразу після їх захоплення в обертовий барабан, запобігаючи гідролізу частинок; можлива безперервна фільтрація без переривання потоку; мінімальна втрата в тиску; видалення дрібних частинок в залежності від отвору сітки; займає небагато місця.

Варто зазначити, що перевагами барабанного фільтра також є його періодичне зворотне промивання, що призводить до зменшення об'єму промивки. Перевагами дискового фільтра є його нижчі капітальні витрати, але він може мати більший об'єм зворотного промивання та подрібнювати більші частинки, розбиваючи їх. До переваг стрічкового фільтра можна віднести дбайливе поводження з твердими частинками та низькі експлуатаційні витрати, але він має вищі капітальні витрати [3, с. 10].

Дослідження в рамках рециркуляційної системи в Інституті прісної води показали, що мікроекранні фільтри з ситовими панелями, що містять отвори розміром 80 мкр., видаляють значну частину чистих твердих речовин, що утворюються за кожен прохід (Summerfelt et al. 1994; Heinen et al. 1996), особливо при додаванні в систему озону (Summerfelt et al. 1996). Дрібнодисперсні частинки, які не були видалені, накопичувалися в рециркуляційній системі. Частинки, які накопичуються в рециркуляційній системі за допомогою мікроекранних фільтрів, мають розмір менше 20–40 мкр. і складають 50% (за масою), або більше частинок, що наближаються до фільтра в рециркуляційному потоці (Heinen et al., 1996) [2, с. 81].

Також розглянемо метод фільтрації за допомогою процесу флотації, тобто метод фільтрації пінно-фракційний. У процесі флотації частинки прикріплюються до бульбашок повітря і відокремлюються від води [3, с. 10 (4)]. Багато дрібних завислих речовин і розчинених органічних твердих речовин, які накопичуються всередині системи рециркуляції неможливо видалити за допомогою традиційних механізмів фільтрації. Пінне фракціонування використовується для видалення та контролю накопичення цих твердих речовин. У цьому процесі повітря вводиться в закритий потік води для створення піни на поверхні потоку збивання, яке видаляє розчинені органічні сполуки шляхом фізичної адсорбції до бульбашок, які піднімаються на поверхню. Дрібні частки та розчинені тверді речовини, затримуються в піні у верхній частині потоку, яку можна збирати і знімати. Основні фактори, на які впливає конструкторське рішення пінного фракціонатора – розмір бульбашок, час контакту між повітрям бульбашки та розчинені органічні сполуки. Пінне фракціонування в природі можна спостерігати на прикладі морської води, ефективність зростає із збільшенням солоності. Це пов'язано зі збільшенням поверхневого натягу, що дозволяє утворювати дрібні повітряні бульбашки в морській воді і, отже, з більш високою фільтруючою областю. Пінне фракціонування працює дуже ефективно, починаючи з солоності 12 ppt і більше. Тому

можна сказати, що таке фільтрування більше підходить для вирощування гідробіонтів, які утримуються в солоній воді, наприклад морська креветка [2, с. 3]. Проте, систематизована інформація, щодо загального впливу різних систем очищення на якість води при використанні в аквакультурі, є досить обмеженою у зв'язку з великою варіативністю систем очистки води для виробництва продукції аквакультури, універсальної одиначної операції для ефективного видалення твердих речовин, яку можна було б рекомендувати на сьогодні, не існує та потребує більш детальнішого дослідження їх впливу відносно систем аквакультури, в яких вони будуть застосовуватися.

Висновки та пропозиції. Отже, процес фільтрація води є невід'ємною частиною сучасних аквакультурних систем, що створює оптимальні умови для життєдіяльності гідробіонтів. Як результат, завдяки процесу фільтрації відбувається покращання якості води, зменшується ризик захворювань, підвищується ефективність використання кормової бази, збільшується продуктивність та економічна ефективність аквакультурних систем, і найголовніше – зменшується негативний вплив на довкілля, що сприяє збереженню природних екосистем. Таким чином, застосування методів фільтрації води в аквакультурі, є не лише бажаним, а й необхідним для забезпечення сталого розвитку цієї галузі. Постійний розвиток технологій фільтрації дозволяє створювати все більш ефективні та екологічні системи для вирощування водних організмів.

Перспективу подальших досліджень вбачаємо у вивченні сучасних тенденцій розвитку фільтрації в аквакультурі, в частині запровадження та імплементації нових фільтруючих матеріалів, можливості оптимізації режимів роботи та інтеграції системи фільтрації з іншими технологіями в системах УЗВ (RAS).

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Ayuso-Virgili G., Jafari L., Lande-Sudall D., Lümme N. Linear modelling of the mass balance and energy demand for a recirculating aquaculture system. *Aquacultural Engineering*. Vol. 101. 2023. P. 1–13. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0144860923000171?via%3Dihub> (дата звернення: 01.07.2024).
2. Piedrahita R., Fitzsimmons K., Zachritz W., Brockway C. Evaluation and Improvements of Solids Removal Systems for Aquaculture. 1996. 145 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/266456584_Evaluation_and_Improvements_of_Solids_Removal_Systems_for_Aquaculture (дата звернення: 09.07.2024).
3. Ebeling J., Vinci B. Solids Capture. Recirculating Aquaculture Systems Short Course. 47 p. URL: <https://slideplayer.com/slide/6040693/> (дата звернення: 25.07.2024).
4. Ranjan R., Kumar S., Raju S., Bathina C., Avadhanula R. Recirculating Aquaculture System Engineering: Design, components and construction. Training Manual on Nursery rearing of Indian pompano in RA. *ICAR- CMFRI Training Manual Series*. 2022. No. 28. P. 19–34. URL: https://eprints.cmfri.org.in/16914/1/ICAR-%20CMFRI%20Training%20Manual%20Series%20No.%2028_2022_Ritesh%20Ranjan.pdf (дата звернення: 10.07.2024).
5. Rathnaweera S., Rusten B., Manamperuma L., Gjevre J., Tranum I. Evaluation of moving bed sand filter for denitrification, suspended solids removal and very low effluent total phosphorus concentrations. *Water Sci Technol*. 2019. 80 (2). P. 232–242. URL: <https://doi.org/10.2166/wst.2019.266> (дата звернення: 01.08.2024).
6. Maiyo J., Dasika S., Jafvert Ch. Slow Sand Filters for the 21st Century: A Review. *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 2023. 20(2). P. 1–26. URL: <https://doi.org/10.3390/ijerph20021019> (дата звернення: 01.07.2024).

7. Hasan Z., Andriani Y. Novel Mechanical Filter for reducing Ammonia Concentration of Silver Barb culture in a Recirculating Aquaculture System (RAS). *Research Journal of Chemistry and Environment*. 2018. 22 (Special Issue August). P. 319–325. URL: https://www.researchgate.net/publication/326913848_Novel_Mechanical_Filter_for_reducing_Ammonia_Concentration_of_Silver_Barb_culture_in_a_Recirculating_Aquaculture_System_RAS (дата звернення: 07.08.2024).
 8. Lawson T. B. Fundamentals of aquacultural engineering. Springer Science & Business Media. 1994. 351 p.
-