



NITRIFICATION EFFICIENCY IN BIOFILTERS UNDER VARIOUS BIOLOADING METHODS FOR CLOSED-CYCLE WATER SUPPLY PLANTS

D.O. Shablii¹, M.D. Bezuhlyi¹, V.V. Kukoba², O.V. Shcherbak¹, I.V. Hnoievyi¹

¹ *State Biotechnological University, Kharkiv, Ukraine*

² *Private Enterprise "Kukoba Volodymyr Vasyliovych"*

ORCID

D.O. Shablii: <https://orcid.org/0009-0009-3572-6999>

M.D. Bezuhlyi: <https://orcid.org/0000-0002-1659-3029>

V.V. Kukoba: <https://orcid.org/0009-0007-1089-9741>

O.V. Shcherbak: <https://orcid.org/0000-0002-4265-3355>

I.V. Hnoievyi: <https://orcid.org/0000-0003-1350-6898>

E-mail: rubovod@gmail.com

Abstract. The rapid development of world aquaculture requires the development of modern technological solutions to maintain stable water quality in industrial aquaculture systems. One of the most effective technologies is recirculation aquaculture system (RAS) installations, which allow significantly reducing the cost of natural and energy resources per kilogram of grown products and ensuring full control of chemical and physical parameters of water. One of the most important elements of the RAS is a biological filter.

In this work, a study of the functioning of various types of biological filter designs used in RAS was carried out, namely: biofilters with fixed bioloading, biological filters with moving bioloading, and drip biofilters. The influence of hydraulic load, water temperature, biological loading area and the influence of contact time on the efficiency of the nitrification process in the RAS were studied.

The ammonia concentration was artificially raised from 1 to 5 mg/l. At the same time, the hydraulic load was increased from 10 to 80 l/min per 1 m² of the bioloading surface area. The results of the study showed that biological filters with moving bioloading showed the highest water filtration efficiency – 95% at the minimum water velocity and ammonia concentration. It has been found that increasing the surface area of biological loading and optimizing hydraulic loading can significantly improve the quality of biological filtration. The integral efficiency coefficient (ICE) of nitrification in the biofilter with a moving bioloading was 91.25, which is 6.43% higher than the ICE of the biofilter with a fixed bioloading and 11.91% higher than the ICE of the trickling biofilter. The results of scientific research can be used in aquaculture farms to improve the nitrification process in the RAS system.

Key words: *aquaculture, quality of nitrification, hydraulic load, nitrogen compounds.*

ЕФЕКТИВНІСТЬ НІТРИФІКАЦІЇ В БІОФІЛЬТРАХ ЗА РІЗНИХ СПОСОБІВ БІОЗАВАНТАЖЕННЯ ДЛЯ УСТАНОВОК ЗАМКНУТОГО ЦИКЛУ ВОДОПОСТАЧАННЯ

Д.О. Шаблій¹, М.Д. Безуглий¹, В.В. Кукоба², О.В. Щербак¹, І.В. Гноєвий¹

¹Державний біотехнологічний університет, Харків, Україна

²ФОП «Кукоба Володимир Васильович»

E-mail: rubovod@gmail.com

Анотація. Стрімкий розвиток аквакультури потребує розвитку сучасних технологічних рішень для підтримання стабільної якості води в промислових аквакультурних системах. Однією з найефективніших технологій є установки замкнутого водопостачання (УЗВ), що дозволяють суттєво знизити витрати на природні та енергетичні ресурси на кожен кілограм вирощеної продукції та забезпечити повний контроль хімічних та фізичних параметрів води. Одним із найважливіших елементів системи УЗВ є біологічний фільтр.

Наведено результати досліджень функціонування різних типів конструкцій біологічних фільтрів, що застосовується в системах УЗВ, а саме: біофільтрів з фіксованим біозавантаженням, біофільтрів з рухомим біозавантаженням та крапельних біофільтрів. Дослідили вплив гідравлічного навантаження, температури води, площі біологічного завантаження та вплив часу контакту на ефективність процесу нітрифікації в УЗВ.

Концентрацію аміаку штучно піднімали від 1 до 5 мг/л. Одночасно гідравлічне навантаження підвищували від 10 до 80 л/хв на 1 м² площі поверхні біозавантаження. Результати дослідження показали, що біологічні фільтри з рухомим біозавантаженням мали найвищу ефективність фільтрації води – 95% за мінімальної швидкості руху води та концентрації аміаку. Було встановлено, що збільшення площі поверхні біологічного завантаження та оптимізація гідравлічного навантаження можуть суттєво покращити якість біологічної фільтрації. Інтегральний коефіцієнт ефективності (ІКЕ) нітрифікації у біофільтрі з рухомим біозавантаженням був 91,25, що на 6,43 % вище ІКЕ біофільтру з нерухомим біозавантаженням та на 11,91% – ІКЕ крапельного біофільтру. Отримані результати наукових досліджень можуть використовуватися в господарствах з аквакультури для удосконалення процесу нітрифікації в системі УЗВ.

Ключові слова: аквакультура, якість нітрифікації, гідравлічне навантаження, азотисті сполуки.

Вступ. Аквакультура є одним із секторів світового виробництва харчових продуктів, який динамічно розвивається. За даними Продовольчої сільськогосподарської організації, доля продукції аквакультури в загальному виробництві та вилові рибних ресурсів постійно збільшується (FAO, 2024). Це пов'язано з підвищенням попиту на білкові продукти харчування та обмеженням природних рибних ресурсів.

Інтенсифікація технологій вирощування риби супроводжується підвищенням швидкості та ступенем забруднення водного середовища. У процесі життєдіяльності риби і розкладання у воді кормових залишків починають накопичуватися азотисті сполуки, а саме аміак, нітрити та нітрати. Ці сполуки негативно впливають на темпи росту гідробіонтів, фізіологічний стан та рівень виживання на всіх етапах вирощування.

Одним з найефективніших рішень для зменшення негативного впливу азотистих забруднень є використання установок замкнутого водопостачання (УЗВ). У таких системах вода багаторазово використовується після проходження через різні види очисного обладнання, до складу якого входять біологічні фільтри, фільтри механічної очистки, системи дезінфекції, тощо.

Біофільтри – це основне обладнання для біологічного очищення оборотної води. У біофільтрах відбувається процес нітрифікації, а саме біологічне окиснення аміаку до нітритів та нітратів. Цей процес відбувається за участю нітрифікуючих бактерій (Ruiz P. et al., 2019).

Сучасні промислові системи для вирощування риби в УЗВ використовують різні конструкції біофільтрів. Найбільш розповсюдженими типами біофільтрів є:

- Біофільтр з рухомим біозавантаженням
- Біофільтр з крапельним біозавантаженням
- Біофільтр з нерухомим біозавантаженням

Всі ці конструкції мають свої гідродинамічні особливості, що впливають на ефективність і швидкість процесу нітрифікації.

Дослідження роботи різних типів біофільтрів дозволяє прогнозувати ефективність їх функціонування та оптимізувати параметри якості води в системі УЗВ на етапі проектування.

Метою досліджень було порівняння роботи різних конструкцій біологічних фільтрів та оцінка їх ефективності у процесі очищення води від аміаку в установках замкнутого водопостачання.

Огляд літератури. З огляду на зростаючий попит на водні продукти та посилення проблеми надмірного вилову риби, необхідно постійно збільшувати кількість риби, вирощеної в аквакультурі (FAO, 2024). Це вимагає розробки технологій ведення сільського господарства, які є не тільки високоефективними, але й екологічно сталими. Установки замкнутого водопостачання (УЗВ) мають переваги над традиційними системами рибництва, а саме – незалежність від великих джерел екологічно чистої води, не забруднюють навколишнє середовище, не конкурують із сільським господарством за виробничі площі. В УЗВ вода багаторазово обробляється та очищується, що зменшує її споживання, водночас дозволяючи повністю контролювати умови навколишнього середовища, такі як температура, рН, концентрація кисню та рівень забруднюючих речовин (Yang et al., 2023). Системи рециркуляційного водопостачання дозволяють вирощувати високоякісну продукцію аквакультури у контрольованих умовах поруч з ринками її збуту. УЗВ у своїх технологічних операціях виконують комплексне очищення води – механічне (фільтрація), біохімічне (денітрифікація) та біофізичне (УФ-випромінення), що дозволяє її використовувати багато разів з мінімальними втратами.

В УЗВ споживання води визначається як об'єм води, що пов'язаний з виробництвом біомаси вирощуваного гідробіонта. Інтенсивність рециркуляції води залежить від якості її очищення і безпосередньо пов'язана зі здатністю біофільтра до нітрифікації (Li et al., 2024).

Інтенсивне вирощування риби є головною умовою в рециркуляційних системах аквакультури, однак за такого методу в системі накопичується органічний азот як метаболіт життєдіяльності риби або внаслідок розкладання залишків кормів (Li et al., 2023). Рециркуляційні системи аквакультури зменшують такий вплив, підтримуючи здорове середовище для риб та інших гідробіонтів (Chen et al., 2019; Roalkvam et al., 2021; Vaage et al., 2021; Lin et al., 2022).

Для успішного виведення азотистих відходів в системах аквакультури розвиток нітрифікуючих бактерій має першорядне значення. Незважаючи на суттєві досягнення в галузі аквакультури, існують суттєві прогалини в знаннях щодо активності бактеріальних нітрифікаторів у різних середовищах, стандартизації стратегій збереження збагачених нітрифікаторів, розкриття екологічного значення, а також успішного інтегрування цих нітрифікаторів у масштабовані та надійні системи аквакультури (Burut-Archanai et al., 2021).

Зниження рівня токсичності розчинених азотистих сполук відбувається завдяки біофільтрам, які за допомоги біозавантаження використовують мікробні колонії нітрифікуючих бактерій для перетворення аміаку в небезпечні нітрати (Neissi et al., 2022). Основним компонентом бактеріального угруповання є аеробні аміакоокислювальні та нітритоокислювальні бактерії, які управляють процесом нітрифікації. Тому контроль цього

процесу є вирішальним у рециркуляційних системах аквакультури, а його неправильне управління призведе до погіршення якості води та загибелі гідробіонтів (Jamal et al., 2024).

В аеробних умовах біологічна фільтрація включає автотрофне видалення амонію та нітритів, а також гетеротрофну деградацію розчиненої та твердої органічної речовини (Kunhiraman et al., 2024). Розчинений азот виводиться з екскрементами у вигляді сечовини та аміаку, а амоній нітрифікується бактеріями до нітрату як кінцевого продукту (Deng et al., 2020): NH_3 (аміак) та NH_4^+ (іон амонію), сума яких називається загальним амонійним азотом.

Азотні розчинені сполуки можуть бути токсичними для риб на рівнях, що варіюються залежно від виду, розміру риби, наявності завислих частинок, жорсткості та рН води (van der Meeren & Mangor-Jensen, 2020; Vera et al., 2023; Zhang et al., 2023). Прісноводні та морські риби дуже чутливі до розчиненого аміаку, його гранично допустимі рівні коливаються в межах 0,068-2,0 мг $\text{NH}_3/\text{л}$ (LC_{50} , 96 год.) (Parvathy et al., 2022). Тривалість впливу підвищених концентрацій аміаку також важлива (Li et al., 2022).

Нітрифікація як процес окислення іона амонію та нітритів відбувається в бактеріальній плівці біозавантаження (Hüpeden et al., 2020). Martens-Habbena et al. (2009) стверджують, що на нітрифікацію впливають такі параметри, як концентрація розчиненого аміаку, розчиненого кисню, температура, рН, лужність, що з часом призводять до розподілу різних таксонів нітрифікуючих бактерій на субстраті. Окисні реакції за нітрифікації каталізуються групами мікроорганізмів, які називаються амонійні та нітритні оксиданти, а також Археями (Godzieba et al., 2024).

Нітрифікацію виконують спеціалізовані бактерії, ріст яких можна контролювати. Додавання органічного вуглецю мало суттєвий вплив на збагачення культури нітрифікуючих бактерій (Wu et al., 2024). Світлове опромінення позитивно впливало на нітрифікацію в бактеріальних системах очищення стічних вод (Lu et al., 2023). Підвищення солоності понад 1‰ погіршило ефективність нітрифікації та змінило структуру нітрифікаторів у мембранному біореакторі (Zou et al., 2023).

Фактори, що впливають на якість нітрифікації в УЗВ недостатньо вивчені. Більшість досліджень направлена на вивчення цього мікробіологічного процесу в системах очищення стічних вод з біофільтрами, які використовуються на промислових очисних спорудах (Yang et al., 2020), у великих акваріумах (Bagchi et al., 2014) та у природному середовищі (Ding et al., 2024), тоді як нітрифікація у біофільтрах УЗВ залишається значною мірою невивченою. У цьому середовищі можуть розвиватися біологічні процеси, що мають свою унікальність. Можуть складатися виняткові взаємозв'язки між бактеріями, відповідальними за ці процеси. Через циклічний рух води та завдяки особливостям харчування риби відбуваються самобутні процеси, які не мають аналогів у подібних системах очищення оборотної води (Almeida et al., 2021).

Технологія вирощування риб в УЗВ має ризик тому, що чисельність нітрифікуючих бактерій у біофільтрі значно знижується в різні періоди доби, або коли їх харчовий субстрат дефіцитний (Bartelme et al., 2017). Після годівлі, коли рівень азотистих сполук зростає, підвищується ризик накопичення токсичних азотистих сполук, оскільки бактерії можуть бути не в змозі переробляти ці сполуки достатньо швидко. Тому наші дослідження направлені на визначення якості очищення оборотної води біологічними фільтрами різних конструкцій, що має велике практичне значення. Ці знання можуть дозволити покращити існуючі фільтри або розробити нові способи для біологічного очищення оборотної води в УЗВ від токсичних азотистих сполук.

Матеріали та методи досліджень. У дослідженні використовували три типи біологічних фільтрів:

1. Біофільтр з нерухомим біозавантаженням. В якості біозавантаження використовувався нерухомий тонучий біологічний носій – гранули *Karsib F-3* з площею поверхні $1000 \text{ м}^2 / \text{м}^3$ води. Кількість біозавантаження становила 140 л.

2. Біофільтр з рухомим біозавантаженням. В якості біозавантаження використовувався рухомий плаваючий біологічний носій – гранули *Karsib F-1* з площею поверхні $1000 \text{ м}^2/\text{м}^3$ води. Біозавантаження становило 140 л.

3. Біофільтр з крапельним біозавантаженням. В якості біозавантаження використовувалися блоки крапельного завантаження з площею поверхні $280 \text{ м}^2/\text{м}^3$ води.

Біофільтри для рухомого та нерухомого біозавантаження були виконані з поліпропілену. Циліндрична ємність з фальш дном забезпечувала рівномірний потік води який подавався вздовж борту та закручувався (рис. 1). Знизу біофільтру було виготовлено конус для можливості легкої промивки біозавантаження та зливу осаду (рис. 2).

Біофільтр з крапельним біозавантаженням являв собою чотири встановлені один на один блоки розміром $0,5 \times 0,5 \times 0,5$ м. Для міцності конструкції блоки були поміщені в металевий каркас. Зверху вода подавалася на перфорований ящик, який забезпечував рівномірний потік по всій поверхні біозавантаження. Для запобігання розбризкування води в приміщенні крапельний біофільтр закривався з усіх сторін щільною ПВХ плівкою (рис. 3).

Досліди проводили за стабільних фізичних та хімічних параметрів води для всіх типів біофільтрів. Вміст розчиненого кисню в воді підтримувався на рівні 7 мг/л. У біофільтрі з рухомим біозавантаженням це забезпечили за допомогою розпилювачів повітря в самому біофільтрі. У біофільтрах з нерухомим біозавантаженням використовували ємність з розпилювачами, в якій проводили аерацію води, а потім насосом подавали повітря у біологічні фільтри.



Рис. 1. Біофільтр для рухомого та нерухомого біозавантаження



Рис. 2. Конус та подвійне дно для промивки біозавантаження

Для аерації використовували компресор *Jebao PA250*. Для регуляції потоку повітря – регулятор потужності *Jebao FC300*. Для перекачування води через біологічні фільтри – насос *Jebao TSP 22000*, оснащений регулятором потужності. Додатково потік регулювався вентильним краном з датчиком, який слугував для точного замірювання кількості води з метою досягнення необхідних показників гідравлічного навантаження на біофільтри.

У першому досліді працювали з чотирма токсичними для гідробіонтів концентраціями аміаку (NH_3), який подавали на біофільтри: 1 мг/л (зустрічається найчастіше у використаній воді УЗВ за високої щільності посадки гідробіонтів), 2, 3 та 5 мг/л. Вміст аміаку у воді визначали хімічним методом за використання реактиву Несслера з подальшою фотокалориметрією утвореної жовто-коричневої хімічної сполуки.

У другому досліді змінювали гідравлічне навантаження (швидкість руху води) на площу поверхні біозавантаження, яке становило 10, 20, 40 та 80 л/хв/м² за концентрації аміаку 1 мг/л.

Площа поверхні біозавантаження була вказана на етикетці.

Ефективність роботи біологічних фільтрів оцінювали за показником рівня нітрифікації, а саме у відсотках рівня видалення аміаку з оборотної води.

Для визначення ефективності кожного біофільтру автори ввели показник „коєфіцієнт ефективності” біофільтра (КЕБ). Він визначається як середній ступінь нітрифікації за заданих режимів роботи і визначається формулою:

$$КЕБ = \frac{\eta_1 + \eta_2 + \eta_3 + \eta_4}{\eta}, \text{ де:}$$

КЕБ – коєфіцієнт ефективності біологічного фільтру, як показник ефективності нітрифікації за різних режимів,

η – кількість експериментальних режимів.

Інтегральний коєфіцієнт ефективності (ІКЕ) розраховали як середнє значення суми коєфіцієнтів ефективності біофільтрів досліджуваних показників

$$ІКЕ = \frac{КЕБ \text{ NH}_3 + КЕБ \text{ гідронав.}}{2}, \text{ де:}$$

КЕБ NH_3 – коєфіцієнт ефективності біофільтру за показником нітрифікації аміаку,

КЕБ гідронав. – коефіцієнт ефективності біофільтру у залежності від швидкості руху оборотної води (гідравлічне навантаження).

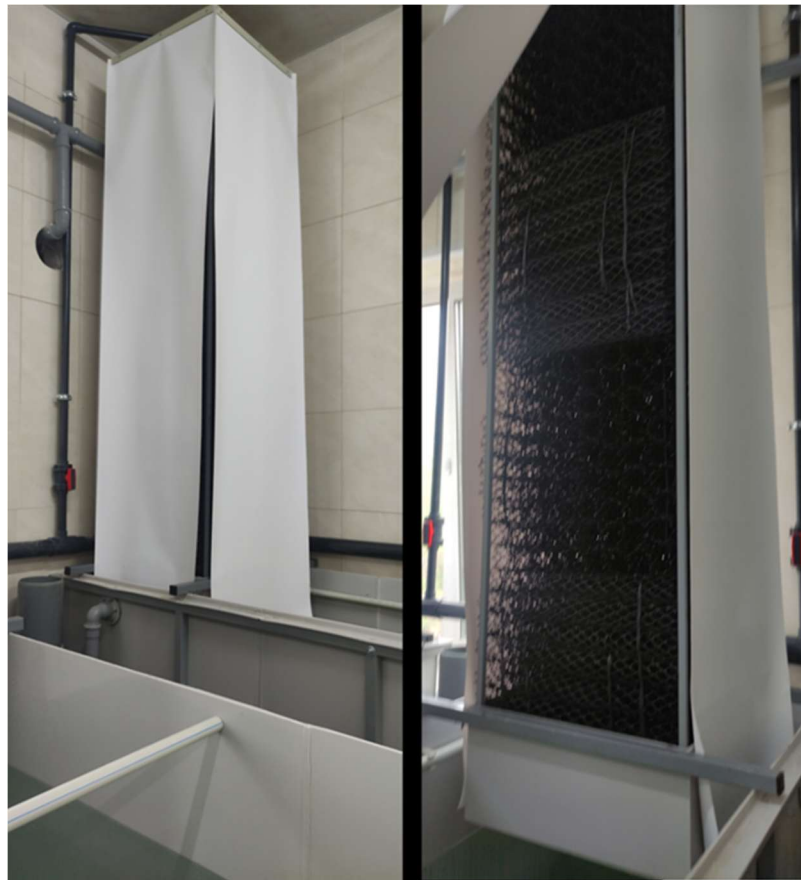


Рис. 3. Крапельний біофільтр

Результати досліджень та їх обговорення. Результати дослідів свідчать, що збільшення концентрації аміаку в воді знижує ефективність нітрифікації для всіх типів біологічних фільтрів за руху води самопливом (10 л/хв).

Найкращий показник нітрифікації мав біологічний фільтр з рухомим біозавантаженням. Його ефективність навіть за самої високої концентрації аміаку становила близько 86% (табл. 1). Найкраще проявили себе біофільтри двох типів з біозавантаженням за найнижчої концентрації аміаку – 1 мг/л, які його знешкоджували на рівні 95% (з рухомим біозавантаженням) та 90 % (з нерухомим біозавантаженням). Крапельний фільтр мав також високий результат нітрифікації – 85 %, але концентрація аміаку залишалася в системі на токсичному для більшості гідробіонтів рівні.

Таблиця 1

Вплив концентрації аміаку на ефективність біофільтрів

Концентрація аміаку, мг/л	Біофільтр з рухомим біозавантаженням %	Біофільтр з нерухомим біозавантаженням %	Крапельний біофільтр %
1	95	90	85
2	93	87	82
3	90	83	78
5	86	78	72

Біофільтр з нерухомим біозавантаженням показав нижчу ефективність за чотирьох експериментальних концентрацій аміаку, порівнюючи з біофільтром з рухомим біозавантаженням. Вважаємо, що рухомість біозавантаження сприяє кращому контакту

нітрифікуючих бактерій з водою, у якій розчинений аміак. Біофільтр з крапельним біозавантаженням показав найнижчі результати ефективності нітрифікації. Головним недоліком цього способу вважаємо малу площу крапельного завантаження (менше у 3,5 раза), порівнюючи з біозавантаженням гранул, що впливає на процес нітрифікації.

За результатами досліджень було виявлено, що підвищення гідравлічного навантаження до 40 л/хв./м² за концентрації аміаку 1 мг/л сприяло покращенню ефективності біологічної фільтрації. Це пояснюємо кращим перемішуванням води та рівномірним контактом води з біоплівкою на поверхні біозавантаження.

Підвищення гідравлічного навантаження до 80 л/хв./м² призвело до зниження ефективності нітрифікації, що теоретично пов'язано зі скороченням часу контакту води з біоплівкою, але це питання потребує додаткових досліджень.

Серед всіх біофільтрів що досліджувалися, найвищою ефективністю нітрифікації відзначаємо біофільтр з рухомим біозавантаженням, оскільки ефективність нітрифікації досягла 95 % за гідравлічного навантаження 40 л/хв./м² (рис. 4). У цьому фільтрі ефективність нітрифікації була вищою за гідравлічного навантаження 10 л/хв./м² – 90 %, 20 л/хв./м² – 93 %, 80 л/хв./м² – 88 %.

Крапельний біофільтр мав найнижчі показники ефективності нітрифікації 10 л/хв./м² – 80 %, 20 л/хв./м² – 83 %, 40 л/хв./м² – 85 %, 80 л/хв./м² – 78 %.

Біофільтр з нерухомим біозавантаженням мав середні показники ефективності нітрифікації аміаку серед досліджуваних біофільтрів.

Коефіцієнт ефективності біофільтрів (КЕБ) за показником нітрифікації аміаку, який вводили в УЗВ в кількості 1 мг/л, коливався у залежності від гідравлічного навантаження. Найвищий показник нітрифікації спостерігали за мінімальною досліджуваною швидкості руху води – 10 л/хв./м² площі поверхні біозавантаження. Середній показник КЕБу біофільтру з рухомим біозавантаженням був вищим на 7,14 % від аналогічного показника біофільтру з нерухомим біозавантаженням, та на 12,9 % – від крапельного біофільтру. Така ж тенденція спостерігалась за чотирьох досліджуваних показників швидкості руху води (рис. 5).

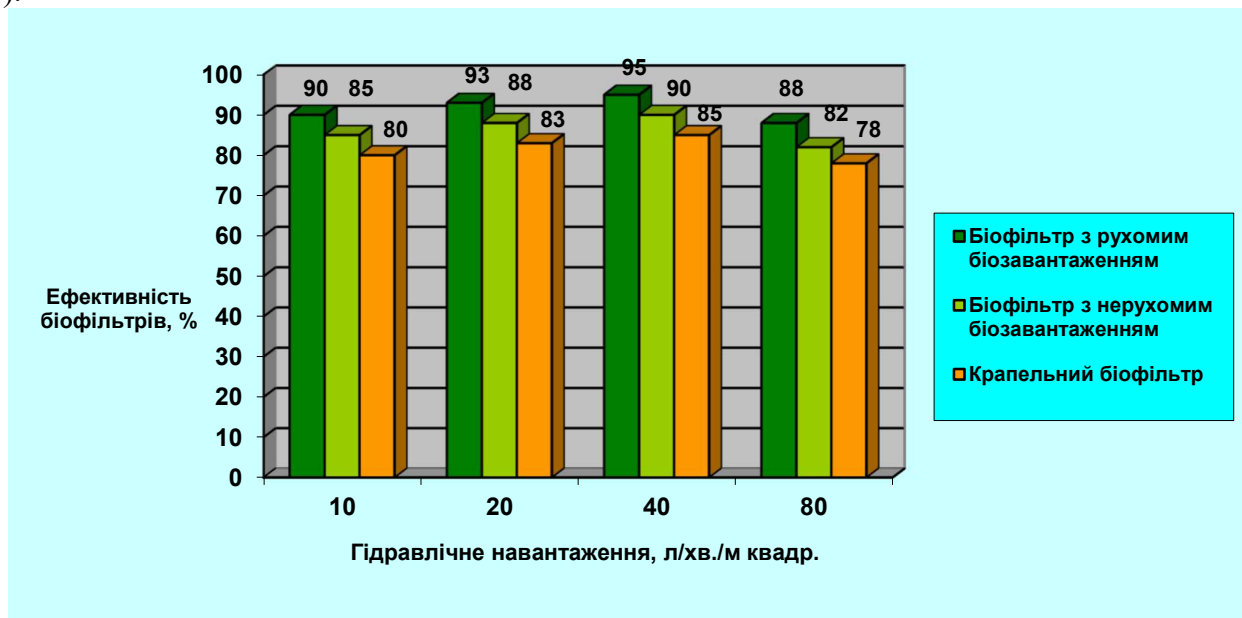


Рис. 4. Ефективність нітрифікації аміаку у залежності від типу біофільтру та гідравлічного навантаження на м² площі поверхні біозавантаження

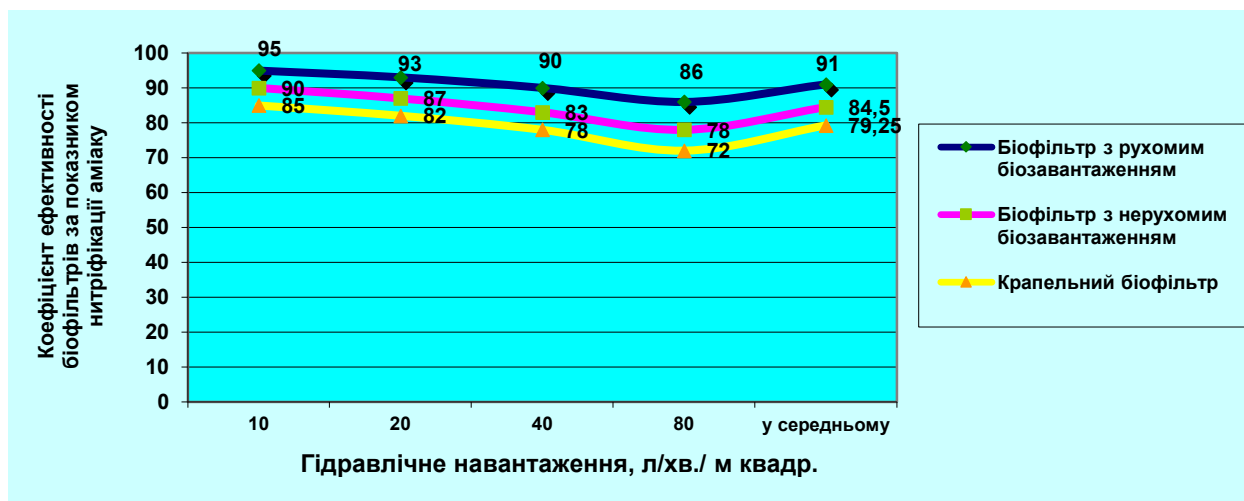


Рис. 5. Коефіцієнт ефективності біофільтрів за показником нітрифікації аміаку у залежності від їх типу та гідравлічного навантаження на м² площі поверхні біозавантаження

КЕБ за показником гідравлічного навантаження на м² площі поверхні біозавантаження був найбільшим у біофільтрі з рухомим біозавантаженням. КЕБ цього фільтру перевищував на 5,73% аналогічний показник біофільтру з нерухомим біозавантаженням, та на 10,92% – від крапельного біофільтру (рис. 6).

Для узагальнення результатів ми визначили інтегральний коефіцієнт ефективності (ІКЕ). ІКЕ біофільтру з рухомим біозавантаженням перевищував ІКЕ біофільтру з нерухомим біозавантаженням на 6,43 %, та – ІКЕ крапельного біофільтру на 11,91 % (рис. 7).

Процес анаеробного окислення токсичних азотистих сполук (анаммокс) визнано екологічно чистим та швидким методом, здатним забезпечити ефективне видалення азоту. Rasmionka et al. (2021) в якості біозавантаження пропонують використовувати «акліматизований» активний мул, що дозволяє зменшити кількість амонійного азоту приблизно на 35,0 %. Abdissa et al. (2025) використовували шар гравію, який виконував функцію біозавантаження. Вони пояснили ефективність цього методу великою площею поверхні гравію, що сприяв мікробній колонізації та кращій нітрифікації азотистих речовин, що повністю підтверджує наші висновки про значну функціональну перевагу біофільтру з рухомим біозавантаженням над крапельним саме через більшу площу поверхні. За цими дослідженнями рівень нітратів після такого очищення становив 0,074 мг/л, порівняно з вихідною водою з УЗВ (1,04 мг/л) (різниця 92,88 %, прим. авт.). у нашому дослідженні біофільтр з рухомим біозавантаженням був ефективним у нейтралізації аміаку на 95 % за його вмісту 1 мг/л, а біофільтр з нерухомим біозавантаженням був дієвим на 90 % за цих же умов.

Zhang et al. (2024) пропонують для очищення води від великих концентрацій аміаку використовувати мембранно-аерований біоплівковий реактор, у якому нітрифікуючі бактерії *Nitrosomonas*, *Nitrospira* та *Candidatus Brocadia* поступово адаптуються, що призводить до ефективності видалення азоту на рівні 60%. Проте, який субстрат вони пропонують у вигляді біозавантаження у біоплівковий реактор автори не вказали.

Navada et al. (2020) прийшли до висновку, що нітрифікуючі біоплівки біозавантаження, що позбавлені органічного вуглецю, демонструють вищу функціональну стійкість. Ahmad et al. (2022) описують технологію сталого очищення стічних вод аквакультури за використання різних видів біозавантаження. Thandar et al. (2016) пропонують для очищення стічних вод використовувати *Nitrosomonas mobilis* Ms1, виділеної з автотрофних нітрифікуючих гранул біореактора. Всі ці автори прийшли до

висновку, що нітрифікація азотистих сполук за використання різних видів біозавантаження має високу ефективність.

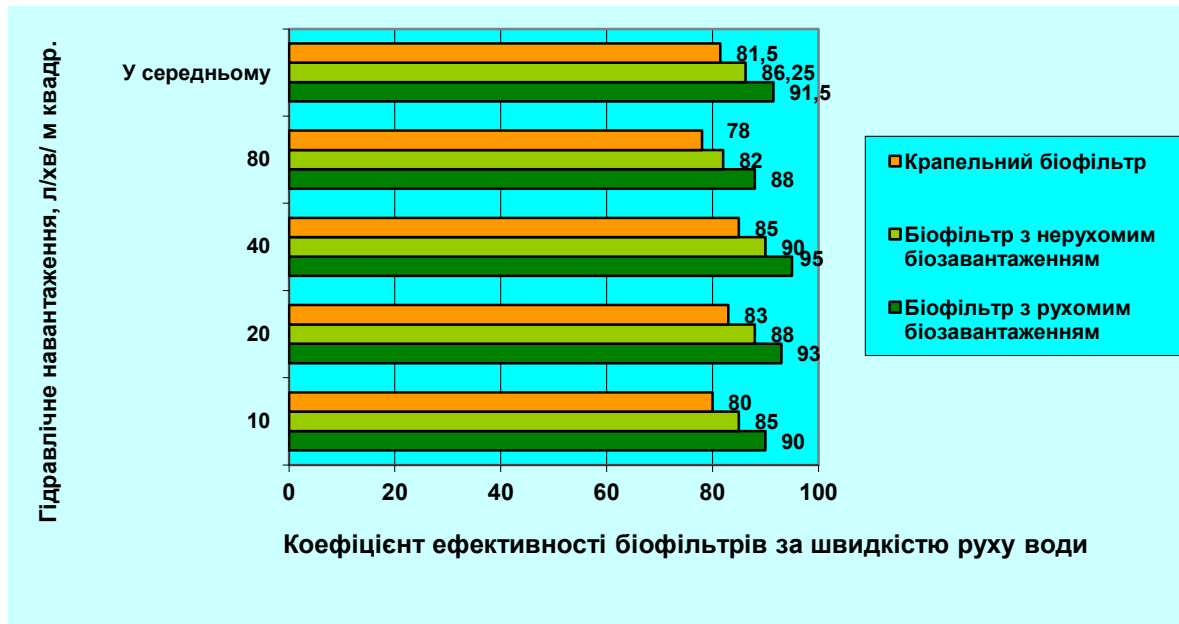


Рис. 6. Коефіцієнт ефективності біофільтрів у залежності від їх типу та гідрравлічного навантаження на м² площі поверхні біозавантаження

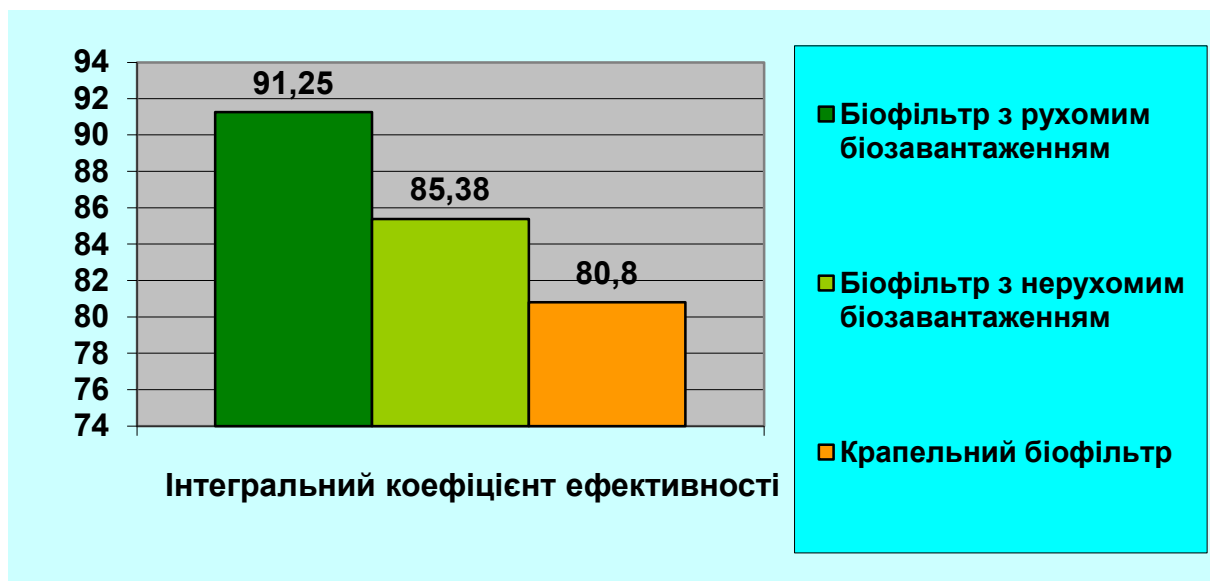


Рис 7. ІКЕ різних типів біофільтрів

У майбутньому плануємо визначити ефективність різних способів очищення води в УЗВ (денітрифікація, УФ-опромінення, тощо) за різної щільності посадки гідробіонтів.

Висновки

Типи конструкцій біофільтрів суттєво впливають на ефективність нітрифікації в рециркуляційних аквакультурних системах. Результати досліджень засвідчили найвищу ефективність біофільтрів з рухомим біозавантаженням. Коефіцієнт ефективності у нейтралізації розчиненого аміаку таких біологічних фільтрів становив 95 %, тоді як біофільтри з нерухомим біозавантаженням та крпельним – 90 % та 85 % відповідно.

Гідрравлічне навантаження 40 л/хв./м² достатнє, щоби розчинений аміак був окислений біофільтром з рухомим біозавантаженням до нетоксичного рівня. Проте, за

гідравлічного навантаження 10 л/хв./м² досягається найвища ефективність процесів нітрифікації.

З підвищенням концентрації розчиненого аміаку в воді поступово знижується ефективність роботи біологічних фільтрів, проте біофільтри з рухомим біозавантаженням показують кращу стійкість до підвищених концентрацій аміаку.

Отримані результати можуть бути використані при проектуванні систем УЗВ у господарствах з аквакультури, а також при модернізації біофільтрів.

References

- Abdissa, B., Gete, M., & Muluneh, E. (2025). Evaluation of nutrient flow through and media – bed aquaponic systems. *Aquaculture, Fish and Fisheries* 5(5): e70122. <https://doi.org/10.1002/aff2.70122>
- Ahmad, A. L., Chin, J. Y., Mohd Harun, M. H. Z., & Low S. C. (2022). Environmental impacts and imperative technologies towards sustainable treatment of aquaculture wastewater: a review. *Journal of Water Process Engineering*, 46: 102553. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102553>
- Almeida, D. B., Magalhães, C., Sousa, Z., Borges, M. T., Silva, E., Blanquet, I., & Mucha, A. P. (2021). Microbial community dynamics in a hatchery recirculating aquaculture system (RAS) of sole (*Solea senegalensis*). *Aquaculture*, 539: 736592. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2021.736592>
- Bagchi, S., Vlaeminck, S. E., Sauder, L. A., Mosquera, M., Neufeld, J. D., & Boon, N. (2014). Temporal and spatial stability of ammonia-oxidizing archaea and bacteria in aquarium biofilters. *PLoS ONE* 9: e113515. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0113515>
- Bartelme, R. P., McLellan, S. L., & Newton, R. J. (2017). Freshwater recirculating aquaculture system operations drive biofilter bacterial community shifts around a stable nitrifying consortium of ammonia-oxidizing archaea and *Comammox Nitrospira*. *Frontiers in Microbiology*, 8: 101. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.00101>
- Burut-Archanai, S., Ubertino, D., Chumtong, P., Mhuantong, W., Powtongsook, S., & Piyapattanakorn, S. (2021). Dynamics of microbial community during nitrification biofilter acclimation with low and high ammonia. *Marine Biotechnology*, 23, 671–681. <https://doi.org/10.1007/s10126-021-10056-1>
- Chen, Z., Chang, Z., Zhang, L., Jiang, Y., Ge, H., Song, X., Chen, S., Zhao, F., & Li, J. (2019). Effects of water recirculation rate on the microbial community and water quality in relation to the growth and survival of white shrimp (*Litopenaeus vannamei*). *BMC Microbiology*, 19, 192. <https://doi.org/10.1186/s12866-019-1564-x>
- Deng, M., Dai, Z., Senbati, Y., Li L., Song, K., & He, X. (2020). Aerobic denitrification microbial community and function in zero-discharge recirculating aquaculture system using a single biofloc-based suspended growth reactor: influence of the carbon-to-nitrogen ratio. *Frontiers in Microbiology*, 11: 1760. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.01760>
- Ding, F., He, T., Qi, X., Zhang, H., An, L., Xu, S., & Zhang, X. (2024). *Comammox Nitrospira* dominates the nitrification in artificial coniferous forest soils of the Qilian mountains. *Science of The Total Environment*, 906: 167653. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167653>
- FAO. *The State of World Fisheries and Aquaculture 2024—Blue Transformation in Action*; FAO: Rome, Italy, 2024; ISBN 978-92-5-138763-4. <https://doi.org/10.4060/cd0683en>
- Godzieba, M., Hliwa, P., & Ciesielski, S. (2024). Network of nitrifying bacteria in aquarium biofilters: an unflinching cooperation between *Comammox Nitrospira* and ammonia-oxidizing archaea. *Water*, 17(1), 52. <https://doi.org/10.3390/w17010052>
- Hüpeden, J., Wemheuer, B., Indenbirken, D., Schulz, C., & Spieck, E. (2020). Taxonomic and functional profiling of nitrifying biofilms in freshwater, brackish and marine RAS biofilters. *Aquacultural Engineering*, 90: 102094. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2020.102094>
- Jamal, A., Nasser, A., & van Rijn, J. (2024). Real-time ammonia estimation in recirculating aquaculture systems: a data assimilation approach. *Aquacultural Engineering*, 106: 102432. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2024.102432>
- Kunhiraman, S., Singh, B., Sarasan, M., & Puthumana, J. (2024). Immobilized microbial consortia: an eco-friendly and sustainable solution for aquaculture waste management. *The Microbe*, 4(3): 100100. <https://doi.org/10.1016/j.microb.2024.100100>

- Li, H., Cui, Z., Cui, H., Bai, Y., Yin, Z., & Qu, K. (2023). A review of influencing factors on a recirculating aquaculture system: environmental conditions, feeding strategies, and disinfection methods. *Journal of the World Aquaculture Society*, 54, 566–602. <https://doi.org/10.1111/jwas.12976>
- Li, h., He, Z., & Li, C. (2024). Lichtfouse E. Nitrogen removal by heterotrophic nitrification-aerobic denitrification bacteria: a review. *Desalination and Water Treatment* 317: 100227. <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100227>
- Li, Q., Hasezawa, R., Saito, R., Okano, K., Shimizu, K., & Utsumi, M. (2022). Abundance and diversity of nitrifying microorganisms in marine recirculating aquaculture systems. *Water* 14: 2744. <https://doi.org/10.3390/w14172744>
- Lin, W., Luo, H., Wu, J., Hung, T.-C., Cao, B., Liu, X., Yang, J., & Yang, P. (2022). A review of the emerging risks of acute ammonia nitrogen toxicity to aquatic decapod crustaceans. *Water*, 15: 27. <https://doi.org/10.3390/w15010027>
- Lu, J., Hong, Y., Wei, Y., & Gu, J.-D. (2021). Nitrification mainly driven by ammonia-oxidizing bacteria and nitrite-oxidizing bacteria in an anammox-inoculated wastewater treatment system. *AMB Express*, 11(1): 158. <https://doi.org/10.1186/s13568-021-01321-6>
- Lu, S., Li, Y., Liu, X., & Cheng, G. (2023). Influence of light irradiation on nitrification in microalgal–bacterial systems for treating wastewater. *Processes*, 11(12): 3453. <https://doi.org/10.3390/pr11123453>
- Martens-Habbenaa, W., Berube, P. M., Urakawa, H., de la Torre, J. R., & Stahl, D. A. (2009). ammonia oxidation kinetics determine niche separation of nitrifying archaea and bacteria. *Nature*, 461: 976–979. <https://www.nature.com/articles/nature08465>
- Navada, S., Knutsen, M. F., Bakke, I., & Vadstein, O. (2020). Nitrifying biofilms deprived of organic carbon show higher functional resilience to increases in carbon supply. *Scientific Reports*, 10: 7121. DOI:[10.1038/s41598-020-64027-y](https://doi.org/10.1038/s41598-020-64027-y)
- Neissi, A., Rafiee, G., Rahimi, S., Farahmand, H., Pandit, S., & Mijakovic, I. (2022). Enriched microbial communities for ammonium and nitrite removal from recirculating aquaculture systems. *Chemosphere* 295: 133811. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133811>
- Parvathy, A. J., Bini, C. D., Jifiriya, M. J., & Varghese, T. (2022). Ammonia induced toxico-physiological responses in fish and management interventions. *Reviews in Aquaculture*, 15(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-64027-y>
- Pasmionka, I. B., Bulski, K., Herbut, P., Boliglova, E., Vieira, F. M. C., Bonassa, G., Bortoli, M., & de Pra, M. C. (2021). Toxic effect of ammonium nitrogen on the nitrification process and acclimatization of nitrifying bacteria to high concentrations of NH₄-N in wastewater. *Energies*, 14(17): 532. <https://doi.org/10.3390/en14175329>
- Roalkvam, I., Drønen, K., Dahle, H., & Wergeland, H. I. (2021). A case study of biofilter activation and microbial nitrification in a marine recirculation aquaculture system for rearing atlantic salmon (*Salmo salar* L.). *Aquaculture Research*, 52, 94–104. <https://doi.org/10.1111/are.14872>
- Ruiz, P., Vidal, J.M., Sepúlveda, D., & Torres, C. (2019). Overview and future perspectives of nitrifying bacteria on biofilters for recirculating aquaculture systems. *Reviews in Aquaculture*, 12(3). <https://doi.org/10.1111/raq.12392>.
- Thandar, S. M., Ushiki, N., Fujitani, H., Sekiguchi, Y., & Tsuneda, S. (2016). Ecophysiology and comparative genomics of *Nitrosomonas mobilis* Ms1 isolated from autotrophic nitrifying granules of wastewater treatment bioreactor. *Frontiers in Microbiology*, 7: 1869. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.01869>
- Tuyet, D. T. A., Hiep, L. M., Binh, H. T., Huyen, L. T., Tang, S. L., Chiang, P. W., & Hao, D. M. (2022). A multi-step nitrifying microbial enrichment to remove ammonia and nitrite in brackish aquaculture systems. *Biodegradation*, 33(4), 373-388. <https://doi.org/10.1007/s10532-022-09988-9>
- Vaage, B., & Myrick, C. (2021). The effects of acute and chronic exposure of ammonia on juvenile burbot (*Lota lota*) growth and survival. *Aquaculture*, 542, 736891. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2021.736891>
- van der Meeren, T., & Mangor-Jensen, A. (2020). Tolerance of Atlantic Cod (*Gadus morhua* L.) Larvae to Acute Ammonia Exposure. *Aquac. Int.* 28: 1753–1769. <https://doi.org/10.1007/s10499-020-00555-8>
- Vera, L., Aguilar Galarza, B., Reinoso S., Bohórquez-Cruz, M., Sonnenholzner, S., & Argüello-Guevara, W. (2023). Determination of acute toxicity of unionized ammonia in juvenile longfin yellowtail (*Seriola rivoliana*). *Journal of the World Aquaculture Society*, 54: 1110–1120. <https://doi.org/10.1111/jwas.12971>

- Wu, J., Xu, W., Xu, Y., & Su, H. (2024). Impact of organic carbons addition on the enrichment culture of nitrifying biofloc from aquaculture water: process, efficiency, and microbial community. *Microorganisms*, 12(4): 703. <https://doi.org/10.3390/microorganisms12040703>
- Yang, J., Jia, L., Guo, Z., Shen, Y., Li, X., Mou, Z., Yu, K., & Lin, J.C.-W. (2023). Prediction and control of water quality in recirculating aquaculture system based on hybrid neural network. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 121: 106002. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.106002>
- Yang, Y., Pan, J., Zhou, Z., Wu, J., Liu, Y., Lin, J.-G., Hong, Y., Li, X., Li, M., & Gu, J.-D. (2020). Complex microbial nitrogen-cycling networks in three distinct Anammox-inoculated wastewater treatment systems. *Water Research*. 168: 115142. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115142>
- Zhang, J.-F., Lai, C.-Y., Cao, X.-X., Hartmann, E. M., & Zhao, H.-Ping (2024). High ammonia loading rate and biofilm reattachment initiated partial nitrification and anammox in a membrane aerated biofilm reactor. *Journal of Water Process Engineering*, 58: 104829. doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.104829
- Zhang, T.-X., Li, M.-R., Liu, C., Wang, S.-P., & Yan, Z.-G. (2023). A Review of the toxic effects of ammonia on invertebrates in aquatic environments. *Environmental Pollution*, 336: 122374. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122374>
- Zou, J., Zhang, K., Wang, S., & Li, M. (2023). The elevation of salinity above 1% deteriorated nitrification performance and reshaped nitrifier community of an MBR: An often-overlooked factor in the treatment of high-strength ammonium wastewater. *Chemosphere*, 335 (9), 139072. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139072>