

3. Тугай Я. А., Майстренко Г. В. Доцільність використання променевих споруд; їх типи і напрями фільтраційних потоків. *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки*. 2013. Вип. 21, с. 58-63.

4. Кравчук А. М., Кравчук О. А. Спеціальні питання гідравліки систем водопостачання та водовідведення: навчальний посібник. Київ: КНУБА, 2020. – 175 с.

5. Кравчук А., Кравчук О. Визначення ефективних конструктивних характеристик збірних дренажних трубопроводів меліоративних систем. *Будівельні конструкції. Теорія і практика*. 2023. Вип. 13. С. 149-159. <https://doi.org/10.32347/2522-4182.13.2023.149-159>

6. Кравчук О.А. Розрахунок необхідної інтенсивності перфорації бічної поверхні розподільчих дренажних трубопроводів. *Комунальне господарство міст. Серія: «Технічні науки»*. 2025. Т. 1, № 189. С. 238-242. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2025-1-189-238-242>

БІОТЕХНОЛОГІЧНІ ПІДХОДИ ДО ОЧИЩЕННЯ ТА РЕЦИРКУЛЯЦІЇ ВОДИ В АКВАПОНІЧНІЙ СИСТЕМІ

Майборода Х.А.

*Національний університет водного господарства та природокористування, Рівне,
h.a.maiboroda@nuwm.edu.ua*

Сучасні аквапонічні системи розглядаються як інтегровані біотехнологічні комплекси замкненого водокористування, у яких поєднуються процеси аквакультури, гідропоніки та мікробіологічної регенерації середовища. Функціонування таких систем базується на перетворенні продуктів метаболізму риб на доступні для рослин поживні сполуки за участю мікроорганізмів, що забезпечує замкнений біогеохімічний цикл основних елементів живлення — азоту, фосфору та калію. Рослини виконують роль кінцевих споживачів мінеральних речовин та одночасно виступають як біологічні фільтри, стабілізуючи хімічний склад води, зменшуючи її токсичність і сприяючи формуванню рівноважного мікробного біоценозу. Такий комплексний підхід забезпечує багаторазову рециркуляцію води, природне очищення середовища та підтримання стабільного біогеохімічного балансу, що робить аквапоніку ефективною та екологічно безпечною технологією, особливо актуальною за умов обмежених водних ресурсів і зростаючого антропогенного навантаження на природні екосистеми.

Нами було проведено дослідження в лабораторних умовах на базі Національного університету водного господарства та природокористування. Дослідна система складалася з гідроблоку для риб та двох ємностей для вирощування рослин, що дозволяло моделювати замкнений цикл водокористування та створювало умови для точного контролю фізико-хімічних і біологічних параметрів.

У досліді використовували сома кларієвого (*Clarias gariepinus*) — вид із високою пластичністю та стійкістю до коливань гідрохімічних показників, а також листовий салат (*Lactuca sativa*), який характеризується високою здатністю поглинати нітратні форми азоту. Риб годували збалансованим комерційним кормом Aller Aqua у дозі 30 г/добу, що забезпечувало стабільне надходження органічних речовин та метаболітів у систему. Освітлення рослин здійснювалося LED-панелями з інтенсивністю 2500 лк/м² та фотоперіодом 16 годин, що відповідало оптимальним умовам фотосинтезу і росту салату.

Функціонування системи базувалося на інтегрованих мікробіологічних та фізіологічних процесах очищення води. Активними агентами біотрансформації були нітрифікуючі бактерії родів *Nitrosomonas* та *Nitrobacter*, які окиснювали амонійний азот

(NH_4^+) у нітрити (NO_2^-) і далі — у нітрати (NO_3^-), що були доступні для рослин. В результаті експерименту концентрація амонійного азоту знизилася з $4,53 \text{ мг/дм}^3$ до $0,72 \text{ мг/дм}^3$, а концентрація нітратів — із $30,4$ до $16,0 \text{ мг/дм}^3$, що підтверджує ефективність біотрансформації та поглинання азоту салатом.

Оптимальні умови для мікробного консорціуму забезпечувалися при розчиненому кисні $6\text{--}8 \text{ мг/дм}^3$, рН $7,0\text{--}7,5$ та температурі $19\text{--}21 \text{ }^\circ\text{C}$, що сприяло стабільній роботі як мікроорганізмів, так і водних біоценозів риб та рослин. Хімічне (ХСК — $51,7 \text{ мг O}_2/\text{дм}^3$) та біохімічне (БСК — $17,4 \text{ мг O}_2/\text{дм}^3$) споживання кисню свідчить про домінування аеробних процесів мінералізації органічних сполук.

Біотехнологічний підхід до очищення води передбачав створення саморегульованого мікробно-рослинного біоценозу, у якому взаємодія автотрофних і гетеротрофних мікроорганізмів забезпечувала трансформацію органічних і неорганічних сполук у форми, доступні для рослин. Біофільтраційні процеси включали мікробну нітрифікацію, часткову денітрифікацію, біодеструкцію органічних залишків та поглинання мінеральних речовин рослинами, що підтримувало низький рівень токсичних форм азоту без застосування хімічних реагентів.

Рециркуляція води в дослідній аквапонічній системі здійснювалась у замкненому контурі, що забезпечував безперервний рух потоку між рибницьким резервуаром та гідропонними модулями. Вода з ємності для вирощування сома кларієвого (*Clarias gariepinus*) насосом подавалась до відділення з салатом листовим (*Lactuca sativa*), де відбувалося природне біологічне очищення завдяки розвитку мікробіоценозу ризосфери. Цей мікробно-рослинний комплекс виконував функцію автономного біофільтра, у якому поєднувалися процеси нітрифікації, денітрифікації та мінералізації органічних речовин. У зоні кореневих систем салату створювалися оптимальні умови для розвитку нітрифікуючих бактерій родів *Nitrosomonas* і *Nitrobacter*, які трансформували амонійні сполуки в нітратні форми, доступні для рослинного поглинання.

Основним джерелом мінеральних елементів у системі слугував рибний корм, який містив у середньому 9% азоту, 2% фосфору та $0,66\%$ калію у перерахунку на абсолютно суху речовину. Внаслідок мікробіологічних і біохімічних процесів значна частина цих елементів залучалася до біогеохімічного кругообігу — частково акумулювалась в біомасі рослин, частково у вигляді мінералізованих форм поверталася у водне середовище для повторного використання. У результаті відбувалося ефективне самоочищення води без застосування зовнішніх реагентів, що забезпечувало екологічну стійкість системи та мінімальні втрати водних ресурсів.

Отже, результати дослідження свідчать, що біотехнологічні підходи до очищення та рециркуляції води в аквапонічних системах забезпечують ефективне функціонування замкненого водного циклу, у якому продукти метаболізму риб через діяльність мікроорганізмів перетворюються на форми поживних речовин, доступні для рослин. Рослинний компонент, виконуючи роль природного біофільтра, стабілізує гідрохімічні показники води, знижує концентрацію токсичних сполук та підтримує рівновагу мікробного біоценозу. У сформованому мікробно-рослинному комплексі інтегровано процеси нітрифікації, часткової денітрифікації, мінералізації органічних речовин та поглинання мінеральних елементів рослинами, що забезпечує високий рівень самоочищення води без залучення хімічних реагентів. Завдяки замкненому контуру рециркуляції, підтриманим оптимальним фізико-хімічним параметрам і взаємодії автотрофних і гетеротрофних мікроорганізмів, досягається стабільний біогеохімічний баланс, зменшуються втрати водних ресурсів і підвищується продуктивність як риб, так і рослин, що підтверджує ефективність та екологічну безпечність аквапонічних технологій.