

**Гроховська Ю.Р.**

Національний університет водного господарства та природокористування

**Кононець С.В.**

Національний університет водного господарства та природокористування

## ФІЗІОЛОГО-БІОХІМІЧНІ ОСНОВИ ОЧИЩЕННЯ ОБОРОТНОЇ ВОДИ УЗВ ВІД СПЛУК НІТРОГЕНУ ТА ФОСФОРУ

*Досліджено кількісні та якісні показники забруднень рибницьких господарств з замкнутим водопостачанням. Відповідно до концепції ІМТА, з метою зниження кількості відходів та підвищення ефективності використання кормів у рибництві проведено аналіз можливих шляхів трансформації продуктів обміну риб, що складають основну частку забруднень. Обґрунтовано доцільність залучення до процесів видалення забруднень оборотної води УзВ представників водних рослин та безхребетних, які мають кормову цінність. Розроблено схеми трансформації нітроген- та фосфоромістких сполук у біомасу кормових організмів.*

**Ключові слова:** екологічні біотехнології, аквакультура, ІМТА, очищення води, УзВ.

**Постановка проблеми.** Постійний ріст потреби населення Землі у рибницькій продукції на тлі одночасного виснаження запасів природних водних біоресурсів, пов'язаного з різними аспектами антропогенного впливу, обґрунтовує тенденцію до зростання обсягів виробництва аквакультури, отриманої інтенсивними методами в установках із замкнутим водопостачанням (далі – УзВ). Базові переваги замкнутих рибницьких комплексів з оборотним водопостачанням можуть бути реалізовані лише за умови ефективного очищення циркуляційної води до показників, що дозволять її використовувати повторно. Оскільки основну частину забруднень становлять продукти метаболізму риб та залишки кормів, головним завданням споруд очищення оборотної води є видалення амонійного нітрогену та нерозчинених органічних сполук. У собівартості вирощеної в УзВ продукції витрати на корми можуть становити 50-70%, також вагомою є частка витрат на очищення води та утилізацію утворених відходів. Отже, ефективні технології водоочищення та раціональне використання кормів є одними пріоритетних напрямків розвитку індустріального рибництва. Успішний досвід розвинутих країн світу у вирощуванні рибницької продукції прогресивними методами підтверджує актуальність даного питання в Україні, де такі господарства лише набувають популярності.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Серед найвагоміших переваг УзВ є мінімаль-

ний вплив на навколишнє середовище, найвищі показники виходу продукції на одиницю об'єму рибницьких ємностей та можливість контролювати основні виробничі параметри, завдяки чому тривалість виробничого процесу суттєво скорочується у порівнянні з екстенсивними методами [1, с. 10-11]. Водночас, повна залежність рибницьких господарств індустріального типу від комбікормів, складники яких мають тваринне та рослинне походження, унеможливує розвиток даного сегменту аквакультури без вирішення проблеми раціонального та ефективного використання їх енергетичного потенціалу [2, с. 84]. Одним з найпрогресивніших підходів щодо забезпечення сталого розвитку в аквакультурі, є концепція інтегрованої мультитрофічної аквакультури, – ІМТА (Integrated multi-trophic aquaculture systems) [3, с. 218; 4, с. 29]. Одночасно зі зниженням негативного впливу на природні водойми, вона передбачає збільшення ефективності використання кормів шляхом організації вирощування у субкультурі з основними об'єктами (рибами) гідробіонтів, що мають харчову цінність та здатні споживати продукти метаболізму риб. У марікультурі вже існує позитивний досвід вирощування цінних видів безхребетних за концепцією ІМТА, які здатні трансформувати неперетравлені залишки рибницьких кормів [5, с. 301]. Найтоксичніший для риб амонійний нітроген може бути асимільований рослинами у прісноводній системі

аквапоніки при вирощуванні багатьох видів сільськогосподарських рослин [6, с. 838], або в умовах ветландів з пристосованими до високого заселення рослинами [7, с. 513; 8, с. 1476].

Більшість представників прісноводних гідробіонтів, які мають харчову цінність для людини, не можуть ефективно вирощуватись у системах очищення оборотної води УЗВ аналогічно до інтегрованої системи марікультури. На нашу думку, більш раціональним є культивування в інтегрованій системі тих груп гідробіонтів, які є цінними кормовими організмами у живленні риб [9, с. 90]. Так, згідно [10, с. 4] моллюски-детритофаги здатні забезпечити трансформацію у власну біомасу близько 45% сполук нітрогену та фосфору, що містяться у неперетравлених залишках кормів для риб. Для досягнення більш глибокого ступеня перетворення органічної речовини у кормову біомасу доцільним є залучення декількох груп очисних агентів, які відрізняються способом живлення та мають відмінні трофічні потреби. Оскільки нітроген та фосфор, що містяться у складі комбікормів, відіграють важливу роль у живленні риб, конверсія даних елементів з органічних забруднень оборотної води у доступну для споживання рибами біомасу кормових організмів дозволить одночасно із видаленням забруднень підвищити ефективність використання кормів.

**Постановка завдання.** Мета роботи – теоретичне обґрунтування біотехнології очищення оборотної води УЗВ з використанням кормових організмів для риб. Для характеристики процесів, які відбуваються при відновленні якості оборотної води рибницького господарства та перетворенні відходів у цінну біомасу кормових організмів було виконано наступні завдання:

1) проаналізовано кількісні показники та біохімічний склад основних забруднень оборотної води УЗВ за даними наукових джерел;

2) досліджено можливості її трансформації кормовими організмами відповідно до концепції ІМТА, які визначаються еколого-біологічними особливостями, зокрема будовою ШКТ;

3) узагальнено фізіолого-біохімічні процеси в організмі очисних агентів, які пов'язані з очищенням води і утворенням біомаси.

**Виклад основного матеріалу.** Згідно з аналітичними розрахунками [1, с. 71], при вирощуванні лососевих зі 100 кг внесеного корму з загальним вмістом білків 45% у воду у вигляді забруднень надходить 4,5 кг нітрогену та 0,55 кг фосфору. При цьому у біомасу риб трансформується лише 2,7 кг нітрогену та 0,45 кг фосфору. Очевидно,

що годівля кормами з нижчим вмістом білку буде супроводжуватись збільшенням обсягів твердих відходів, проте загальна кількість нітрогену та фосфору у продукції метаболізму суттєво не зміниться. Отже, в умовах замкнутого контуру УЗВ існує потенційна можливість збільшити ефективність використання кормів шляхом переведення у доступну ридам форму тих забруднень, що фактично являють собою незасвоєні компоненти корму. Традиційна технологія очищення оборотної води УЗВ характеризується утворенням пропорційної кількості твердих відходів, що складаються не лише з катаболітів риб, а й приросту мікробіоти очисних споруд, яка долучається до мінералізації органічної речовини.

Для реалізації очевидних переваг концепції ІМТА конструкції очисних споруд оборотної води мають забезпечити умови для вирощування інтегрованої субкультури. Водночас, враховуючи форму, в якій містяться сполуки нітрогену та фосфору, для трансформації їх у біомасу кормових організмів необхідно залучити декілька окремих груп очисних агентів. Так, найбільш раціональним шляхом видалення амонійного нітрогену є його пряма асиміляція водними рослинами. Відповідно до концепції ІМТА, нами запропоновано використання для даних процесів представників ряскових, які мають високу кормову цінність для більшості культивованих риб. Відповідно до представлених аналітичних даних, у біомасу ряскових можна трансформувати близько 3,9 кг нітрогену, який надходить у систему у вигляді амоній-йону. Враховуючи, що залучені до трансформації органічних забруднень безхребетні у процесі метаболізму також будуть виділяти у воду рідкі катаболіти, кількість асимільованого рослинами нітрогену може зрости пропорційно до обсягів мінералізованих забруднень. Виділені у розчиненій формі катаболіти безхребетних, як і розчинені продукти метаболізму риб з оборотною водою транспортуються у фітореактор, де завдяки асиміляції рослинами відбувається їх видалення з води. Частина розчинених органічних забруднень завдяки сорбції затримується на поверхні біоплівки споруд біологічного очищення та окислюються гетеротрофною мікробіотою споруди. Тому включення у біоценоз такого біореактора визначених груп очисних агентів забезпечує одночасну мінералізацію нерозчинених домішок та приросту біоплівки. Органічні рештки, які споживаються безхребетними тваринами у системі очистки води, крім кінцевих продуктів обміну речовин, містять суміш білків, пептидів,

амінокислот, ліпідів, полі- і моносахаридів, тригліцеридів, стеринів, фосфатидів, вільних жирних кислот, нуклеїнових кислот та їх складових.

Нітрогеновмісні та фосфоровмісні органічні речовини надходять з тваринними і рослинними рештками зі складу сухих, гранульованих і живих кормів для риб. Зокрема, до числа нітрогеновмісних речовин у складі органічної речовини відносяться білки та амінокислоти, нуклеїнові кислоти і їх складові (нуклеотиди, нуклеозиди, азотисті основи), похідні моносахаридів, хітин тощо. Значна кількість фосфору міститься у складі біополімерів клітин – білків, нуклеїнових кислот, ліпідів. З фосфоліпідів та фосфопротеїдів утворюються мембранні структури клітини і клітинних органолів. Фосфор входить до складу багатьох макроергічних сполук, які беруть участь в енергетичному обміні організму.

Білки та їх складові у складі органічних решток корму представлені переважно протеїдами та протеїнами (пептиди), амінокислотами. Розрізняють білки прості (протеїни) та складні (протеїди). Нуклеотиди присутні в усіх рослинних і тваринних кормах у вільній формі або у складі нуклеїнових кислот та/або нуклеопротеїдів. Вони являють собою внутрішньоклітинні компоненти, які задіяні у численних біохімічних процесах, є мономерами нуклеїнових кислот, беруть участь у перенесенні хімічної енергії (у вигляді АТФ та інших нуклеотидтрифосфатів), у процесах біосинтезу як

біорегулятори та коензими. Нуклеотиди побудовані з азотистої основи (піримідинової або пуринової), пентози (рибозою або дезоксирибозою) та містить від одного до трьох залишків фосфатної кислоти.

Поліпептиди та олігопептиди зазнають протеолізу під впливом ендо- і екзопептидаз і врешті-решт розщеплюються до вільних амінокислот (рис. 1). Зокрема, пепсин, який відноситься до групи ендопептидаз, був одним із перших виявлених ферментів, який відкрив Теодор Шванн ще у 1836 р.

Білки всмоктуються у вигляді амінокислот, низькомолекулярних пептидів і простетичних груп. Всмоктані продукти гідролізу розносяться кров'ю до органів і тканин, включаються до різних метаболічних циклів. З амінокислот синтезуються білки та біологічно активні речовини; частина амінокислот дезамінується і використовується для енергетичних потреб та біосинтезу ліпідів, вуглеводів тощо.

Аміак, який утворюється під час дезамінування амінокислот, пуринових і піримідинових основ та інших нітрогеновмісних сполук, використовується для амінування субстратів – у процесах біосинтезу амінокислот, азотистих основ тощо. Зокрема, бере участь у реакціях трансамінування, тобто перенесення  $\alpha$ -аміногрупи від амінокислоти на  $\alpha$ -вуглецевий атом  $\alpha$ -кетокислоти – акцептора аміногрупи. Частина аміаку, як кінцевий продукт

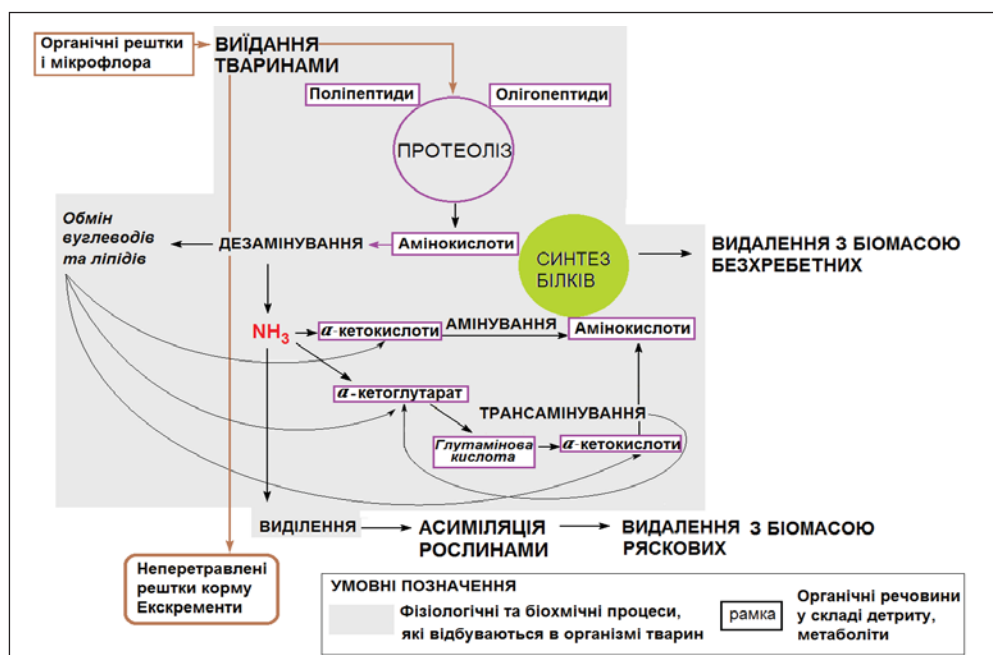


Рис. 1. Трансформація нерозчинених нітрогеновмісних органічних речовин оборотної води у біомасу очисних агентів

метаболізму тварин, через спеціальні органи безхребетних гідробіонтів – прото- та метанефридії, виділяється безпосередньо у воду.

Фосфоровмісні розчинені метаболіти риб представлені переважно фосфатами, що також можуть бути ефективно асимільовані рослинами. Фосфати засвоюються рослинами з розчину, вони їм необхідні для біосинтезу нуклеїнових кислот, АТФ тощо. Такий шлях дозволяє забезпечити пряму їх трансформацію у доступну рибакам форму без утворення проміжних продуктів. Водночас, основна частина сполук фосфору, що надходять у воду, знаходиться у нерозчиненому вигляді (0,37 кг з 0,55 кг відповідно до [1, с. 71]). Додатково фосфор виділяється також і безхребетними у вигляді солей фосфату. Фосфоліпіди або фосфатиди – це складні ефіри, побудовані з багатоатомного спирту, високомолекулярних жирних кислот, фосфорної кислоти і азотистої основи. Фосфоліпіди складають 40-90% від загальної кількості ліпідів у мембрані клітин, тому рецептури комбікормів враховують загальну потребу риб у цьому елементі.

Після потрапляння у травну систему тварини, фосфопротеїди під впливом протеаз гідролітично розщеплюються до пептидів та фосфорної кислоти, нуклеопротеїди – до пептидів та нуклеїнових кислот (рис. 2).

Далі нуклеїнові кислоти під впливом нуклеаз зазнають гідролізу до нуклеотидів, які у свою чергу розщеплюються до вільних азотистих основ,

пентоз та фосфатної кислоти під впливом нуклеотидаз та нуклеозидаз. Продукти розщеплення органічних речовин всмоктуються у кишці, у т.ч. фосфорна кислота у вигляді натрієвих та калієвих солей, азотисті основи – за участю нуклеотидів.

Описані вище біохімічні процеси трансформації нітроген- та фосфоровмісних органічних сполук принципово не відрізняються у представників трьох основних груп безхребетних, залучених до процесів очищення, – молосків, олігохет та вищих ракоподібних. Водночас, ці тварини мають різні пристосування для захоплення та заковтування корму, які зумовлені їх еколого-біологічними особливостями: мешкання у товщі детриту або на твердих поверхнях, живлення рослинною чи тваринною їжею, еврифагія, будова травної системи тощо. Послідовність залучення очисних агентів до трансформації забруднень має враховувати фазово-дисперсний стан нерозчинених домішок та особливості їх видалення механічними методами.

Оскільки дрібнодисперсні забруднення оборотної води УЗВ достатньо ефективно затримуються у біореакторах з інертним волокнистим носієм типу «Вія» або з площинним завантаженням, такі умови дозволяють черевоногим молоскам легко пересуватись та харчуватись утвореними обростаннями, що включають мікробіоту. Обростання з твердих поверхонь зішкрібаються молосками за допомогою радули – кутикулярного покриву глоткового виросту або «язика», який вкритий хітиновими зубами. Органами виділення молосків є

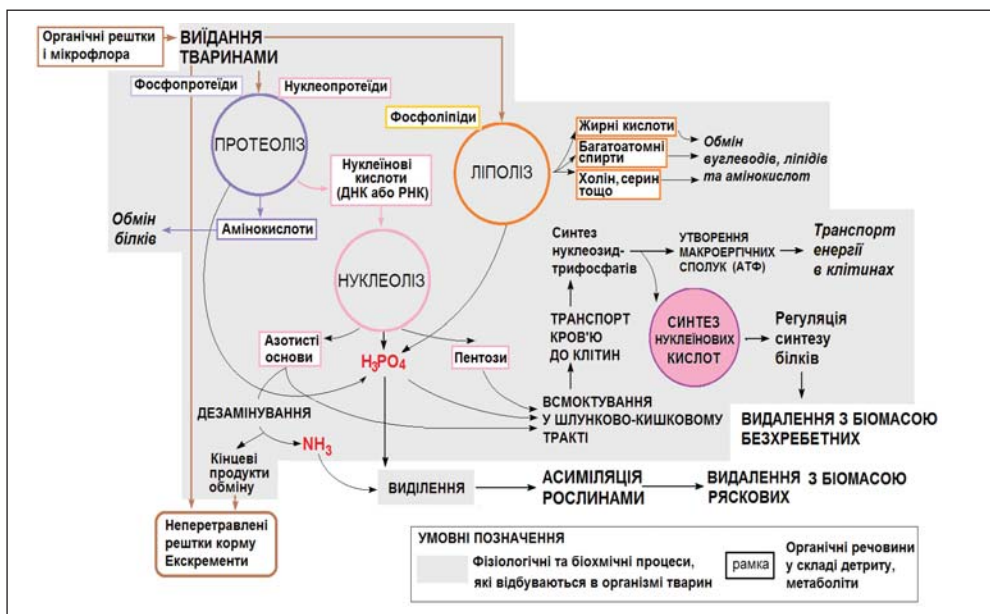


Рис. 2. Трансформація нерозчинених фосфоровмісних органічних речовин оборотної води у біомасу очисних агентів

нирки (видозмінені метанефридії), які виводять кінцеві продукти обміну речовин. У конструкції біореактора для культивування молюсків необхідно передбачити прийом для накопичення та відведення твердих продуктів метаболізму.

Більшість малоцетинкових черв'яків, зокрема трубочники (*Tubifex tubifex* L.), харчуються детритом, який вони поглинають з ґрунтом. Шлунково-кишковий тракт олігохет, по суті, являє собою трубку, яка проходить вздовж тіла, але має потужну м'язову глотку безпосередньо за порожниною рота. Відповідно, для залучення олігохет у процеси трансформації забруднень найкраще підійдуть умови затопленого біологічного біофільтра, де створюються умови для інтенсивного замулення сипучого завантаження. Виділення в олігохет відбувається через невеликі протоки, відомі як метанефридії. Тверді відходи, які виділяються олігохетами у процесі мінералізації органічної речовини, необхідно видаляти зі споруди шляхом періодичної промивки фільтруючого завантаження.

#### Висновки:

1. За даними наукових джерел встановлено, що до складу органічних забруднень оборотної води

УЗВ входять нітрогено- та фосфоровмісні сполуки, які мають кормову цінність для безхребетних тварин – прості білки, фосфопротеїди, нуклеопротеїди, фосфоліпіди, полісахариди, а також продукти їх розщеплення.

2. Для реалізації концепції інтегрованої мультитрофічної аквакультури у межах замкнутого контуру УЗВ доцільно забезпечити культивування як очисних агентів представників водних рослин, червононогих молюсків, олігохет та вищих ракоподібних.

3. Амонійний нітроген і фосфор, які екскретуються тваринами, у межах блоку очищення оборотної води асимілюються вищими рослинами у вигляді амоній-іону і фосфатів, що дозволяє трансформувати практично всі розчинені забруднення у доступну рибакам білкову біомасу.

4. Включення у процеси мінералізації органічних забруднень оборотної води червононогих молюсків, олігохет та вищих ракоподібних забезпечить перехід нітроген- та фосфоровмісних нерозчинених сполук у приріст біомаси даних кормових організмів з пропорційним зменшенням кількості твердих відходів.

#### Список літератури:

1. Bregnballe J. A. Guide to Recirculation Aquaculture An introduction to the new environmentally friendly and highly productive closed fish farming systems. FAO and EUROFISH. 2015. 97 p.
2. Martins C.I.M., Eding E.H., Verdegem M.C.J. et al. New developments in recirculating aquaculture systems in Europe: A perspective on environmental sustainability. *Aquacultural Engineering*. 2010. Vol. 43. Is. 3. P. 83-93.
3. Neori A., Ragg N.L.C., Shpigel M. The integrated culture of seaweed, abalone, fish and clams in modular intensive land-based systems: Performance and nitrogen partitioning within an abalone (*Haliotis tuberculata*) and macroalgae culture system. *Aquacultural Engineering*. 1998. Vol.15. P. 215-239.
4. Marton E. Polycultures of fishes in aquaponics and recirculating aquaculture. *Aquaponics Journal*. 2008. Vol. 48. P. 28-33.
5. Hussenot J., Lefebvre S., Brossard N. Open-air treatment of wastewater from land-based marine fish farms in extensive and intensive systems: Current technology and future perspectives. *Aquat. Living Resour.* 1998. Vol. 11. P. 297-304.
6. Turcios Ariel E., Papenbrock J. Sustainable Treatment of Aquaculture Effluents – What Can We Learn from the Past for the Future? *Sustainability*. 2014. Vol. 6. P. 836-856.
7. Webb J.M., Quinta R., Papadimitriou S. et al. Halophyte filter beds for treatment of saline wastewater from aquaculture. *Water Res.* 2012. Vol. 46. P. 512-514.
8. Waller U., Buhmann A.K., Ernst A. et al. Integrated multi-trophic aquaculture in a zero-exchange recirculation aquaculture system for marine fish and hydroponic halophyte production. *Aquaculture International*. 2015. Vol. 23. Is. 6. P. 1473-1489.
9. Саблій Л.А., Коренчук М.С., Кононцев С.В., Гроховська Ю.Р. Реалізація концепції системи інтегрованої мультитрофічної аквакультури у прісноводних рибницьких господарствах з замкнутим водопостачанням. *Вісник Хмельницького Національного Університету. Технічні науки*. 2017. №5. С. 89-93.
10. Crab R., Avnimelech Y., Defoirdt T., Bossier P., Verstraete W. Nitrogen removal techniques in aquaculture for a sustainable production. *Aquaculture*. 2007. Vol. 270. P. 1-14.

### **ФИЗИОЛОГО-БИОХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОЧИСТКИ ОБОРОТНОЙ ВОДЫ УЗВ ОТ СОЕДИНЕНИЙ АЗОТА И ФОСФОРА**

*Исследованы количественные и качественные показатели загрязнений рыбоводных хозяйств с замкнутым водоснабжением. Согласно концепции ИМТА, с целью снижения количества отходов и повышения эффективности использования кормов в рыбоводстве проведен анализ возможных путей трансформации продуктов обмена рыб, составляющих основную часть загрязнений. Обоснована целесообразность использования в процессах удаления загрязнений оборотной воды УЗВ представителей водных растений и беспозвоночных, которые имеют кормовую ценность. Разработаны схемы трансформации nitrogen- и фосфоросодержащих соединений в биомассу кормовых организмов.*

**Ключевые слова:** экологические биотехнологии, аквакультура, ИМТА, очистка воды, УЗВ.

### **PHYSIOLOGICAL AND BIOCHEMICAL BASES OF THE CIRCULATING WATER TREATMENT IN RAS FROM NITROGEN AND PHOSPHORUS COMPOUNDS**

*Quantitative and qualitative indicators of pollution of fish farms with closed water supply were studied. According to the IMTA approach, an analysis of possible ways of transforming the fish exchange products was made, which constitute the main part of the contamination, in order to reduce the amount of waste and improve the efficiency of using fodder in fish farming. The expediency of the involvement selected representatives of aquatic plants and invertebrates, which have feed value, in the process of removing contaminations of recycled water from RAS was substantiated. Schemes of transformation of nitrogen- and phosphorus-containing compounds into biomass of feed organisms were developed.*

**Key words:** environmental biotechnology, aquaculture, IMTA, water treatment, RAS.