

УДК 628.35

С.В. КОНОНЦЕВ

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ВИДАЛЕННЯ СПЛУК НІТРОГЕНУ З ОБОРОТНОЇ ВОДИ ІНДУСТРІАЛЬНИХ РИБНИЦЬКИХ ГОСПОДАРСТВ

***Анотація.** Обґрунтовано ефективність використання ряскових для очищення оборотної води в установках з замкнутим водопостачанням (УЗВ) від сполук Нітрогену. Визначено основні фактори, що впливають на інтенсивність процесів асиміляції рослинами біогенних елементів. Представлено математичний опис динаміки амоній-йону в умовах замкнутого контуру УЗВ та залежності темпів росту ряскових від абіотичних факторів у фітореакторі для очищення оборотної води. Визначено раціональні шляхи регулювання очисної потужності фітореактора, проаналізовано можливі напрямки інтенсифікації процесів асиміляції сполук Нітрогену з оборотної води УЗВ.*

***Ключові слова:** очищення води, видалення сполук Нітрогену, УЗВ*

Вступ

Вирощування рибницької продукції в установках з замкнутим водопостачанням (УЗВ) забезпечує найвищу продуктивність з одиниці виробничих площ та характеризується мінімальним впливом на навколишнє середовище. Інтенсивні методи аквакультури з оборотним водопостачанням є чи не єдиним рішенням проблеми задоволення зростаючої потреби людства у продукції рибництва в умовах обмеженого потенціалу природних біоресурсів. Повторне використання води в УЗВ можливе лише за умови відновлення її якості після забруднення у рибницьких басейнах, тому належне очищення оборотної води та якість комбікормів відіграють виключно важливу роль у ефективності вирощування риб у системах з рециркуляцією.

Оскільки витрати на очищення оборотної води безпосередньо відображаються на собівартості вирощеної в УЗВ продукції, потреба у використанні надійних та енергоощадливих технологій водоочищення в даній галузі рибництва є актуальною. Запропонована нами технологія багатастадійного біологічного очищення оборотної води УЗВ дозволяє з високою ефективністю видаляти розчинені сполуки Нітрогену та Фосфору, трансформуючи їх у біомасу рослин-очисних агентів [1]. Таким чином забезпечується конверсія незасвоєних рибами цінних компонентів корму у білкову біомасу, що буде використана для підгодівлі об'єктів вирощування. Враховуючи, що амоній-йон є одним з найбільш токсичних метаболітів, які лімітують темпи росту риб в УЗВ, на основі опису динаміки даної сполуки у замкнутому контурі можна здійснювати розрахунок споруд біологічного очищення оборотної води та потреби у обсягах підживлювальної води.

© С.В. Кононцев, 2018

1. Очищення оборотної води УЗВ від сполук Нітрогену у процесі асиміляції рясковими

Обґрунтування використання ряскових в якості очисних агентів представлено при розробці методів очищення господарсько-побутових, промислових стічних вод, стоків тваринницьких комплексів [2–5]. Отримані результати підтверджують можливість адаптації окремих видів ряскових (*Lemmaeidae*) до характерних показників забруднень стічних вод, а також високу асиміляційну потужність рослин при видаленні біогенних елементів.

Фітореактор з рясковими, включений у схему біологічного очищення оборотної води, має забезпечити видалення сполук Нітрогену у формі амоній-йону, які є основними розчиненими продуктами метаболізму риб, а також амонійного Нітрогену, що виділяється при мінералізації органічних забруднень очисними агентами біореакторів I та II ступеня (рис. 1).



Рисунок 1 – Принципова схема технології біологічного очищення оборотної води УЗВ

Оскільки в межах представленої системи практично неможливо забезпечити повне видалення з оборотної води забруднень, частина води у вигляді мулової суміші виводиться з контуру (подається на затоплений біофільтр), а втрачений об'єм поповнюється за рахунок підживлювальної води з природного джерела водопостачання.

Існуючі математичні моделі, що описують ріст популяції ряскових або динаміку вмісту у воді макроелементів внаслідок асиміляції рослинами, розроблені для водойм, що зазнають антропогенного впливу [6]. Окремими авторами здійснено моделювання процесів росту ряскових при їх культивуванні в ролі очисних агентів господарсько-побутових стічних вод або сировини для виробництва біопалива [7, 8]. На основі даних результатів визначено асиміляційний потенціал рослин за Нітрогеном та Фосфором, досліджено найбільш вагомі чинники, що впливають на темпи асиміляції в природних умовах. Склад забруднень, фізико-хімічні параметри оборотної води та особливості водокористування УЗВ створюють передумови для більш ефективного використання ряскових у процесах очищення від біогенних елементів, адже в межах замкнутого контуру мінімізується негативний вплив на рослини багатьох природних факторів.

2. Математичний опис процесів видалення сполук Нітрогену з оборотної води УЗВ

Відповідно до процесів, що протікають у замкнутому контурі рибницької системи, балансове рівняння динаміки амонійного Нітрогену буде мати наступний вигляд:

$$dC_{NH_4}/dt = Load_{NH_4} - Rate_{nitr} - Outage_{NH_4} - Uptake_{NH_4}, \quad (1)$$

де:

C_{NH_4} – концентрація амонійного Нітрогену в оборотній воді, г/дм³;

$Load_{NH_4}$ – обсяги амонійного Нітрогену, що надходять в систему у вигляді продукції метаболізму риб, г/доб;

$Rate_{nitr}$ – зниження концентрації амонійного Нітрогену внаслідок пасивної нітрифікації у аеробних біореакторах, г/доб;

$Uptake_{NH_4}$ – амонійний Нітроген, видалений з води у процесі асиміляції рослинами, г/доб;

$Outage_{NH_4}$ – амонійний Нітроген, видалений із скидною водою, г/доб.

Навантаження за амонійним Нітрогеном складається з рідких продуктів метаболізму риб та амонійного Нітрогену, що виділяється в процесі мінералізації органічних сполук мікробіотою:

$$Load_{NH_4} = Load_{fish} + Load_{sol} + Load_{gas}, \quad (2)$$

де:

$Load_{fish}$ – виділений рибами Нітроген у формі аміаку/амоній-йону, г/доб;

$Load_{sol}$ – кількість амонійного Нітрогену, що утворився внаслідок розкладу розчинених органічних сполук гетеротрофною мікробіотою (амоніфікації) у біореакторах, г/доб;

$Load_{gas}$ – кількість амонійного Нітрогену, що утворився внаслідок метаболізму червоногих молюсків, г/доб.

Продукція метаболізму риб може бути розрахована з виразу:

$$Load_{fish} = 0,065 \cdot F \cdot k_p / 100, \quad (3)$$

де:

F – кількість корму, що вноситься у рибницькі басейни, кг/доб;

k_p – вміст білків у кормі, %.

Середній показник кормів, призначених для годівлі риб в УЗВ – 45%.

Відповідно:

$$Load_{fish} = 0,065 \cdot F \cdot 45 / 100 = 0,03 \cdot F. \quad (4)$$

Додаткове навантаження за амонійним Нітрогеном, що відбувається в процесі амоніфікації, може бути розраховане, виходячи з аналітичних даних [9], де зазначено, що при згодовуванні рибама 100 кг корму у розчиненому вигляді у воду надходить близько 3,9 кг сполук Нітрогену. Якщо у вигляді аміаку риби виділяють близько 3 кг пропорційно до вказаної кількості корму, очевидним є те, що близько 1 кг розчиненого Нітрогену надходить у воду у формі інших сполук (амінокислоти та інші розчинені продукти метаболізму). Відповідно, саме ця кількість сорбується на біоплівці та трансформується гетеротрофною мікробіотою. З урахуванням засвоєння мікробіотою біореактора частини сполук Нітрогену на приріст власної біомаси, навантаження від амоніфікації буде становити:

$$Load_{sol} = 0,007 \cdot F. \quad (5)$$

Виділений молюсками амонійний Нітроген можна розглядати як продукт катаболізму, що утворився внаслідок перетравлювання затриманих у біореакторі нерозчинених забруднень оборотної води, а також приросту біоплівки споруди:

$$Load_{gas} = Load_{gasdetr} + Load_{gasTSS}, \quad (6)$$

де:

$Load_{gasDetr}$ – кількість амонійного Нітрогену, що виділяється внаслідок споживання приросту біоплівки, г/доб;

$Load_{gasTSS}$ – кількість амонійного Нітрогену, що виділяється внаслідок споживання нерозчинених домішок, г/доб.

Враховуючи здатність молюсків засвоювати 45-55% Нітрогену із спожитого детриту [10] та припустивши, що біоплівка забезпечує приріст лише завдяки розчиненим сполукам, що сорбуються на ній, отримаємо:

$$Load_{gasdetr} = 0,55 \cdot (0,01 - 0,007) \cdot F = 0,00165 F. \quad (7)$$

Кількість амонійного Нітрогену, що надійде у воду в процесі перетравлювання молюсками нерозчинених сполук, розрахуємо на основі аналітичних даних: відповідно до [2], на кожні 100 кг згодованого корму надходить близько 600 г Нітрогену у нерозчиненій формі. Основна частина незасвоєного Нітрогену виділиться у вигляді твердих відходів, що міститимуть близько 30% від його початкової кількості. Відповідно, у вигляді рідких метаболітів молюсків у воду надійде близько 25% від початкової кількості:

$$Load_{gasTSS} = 0,006 \cdot F \cdot 0,25 = 0,0015 \cdot F. \quad (8)$$

Отже, навантаження за амонійним Нітрогеном, виділеним у процесі життєдіяльності молюсків, становитиме:

$$Load_{gas} = 0,00165F + 0,0015F = 0,0031 \cdot F. \quad (9)$$

Таким чином, рівняння (2), що визначатиме потенційне навантаження за амонійним Нітрогеном, перетворюється у залежність:

$$Load_{NH_4} = 0,03 \cdot F + 0,007 \cdot F + 0,0031 \cdot F = 0,04 \cdot F. \quad (10)$$

Пасивна нітрифікація, яка може протікати у аеробних біореакторах, згідно з дослідженнями забезпечує зниження концентрації амонійного Нітрогену на 7–10%:

$$Rate_{nitr} = k_{nitr} \cdot Load_{NH_4}; \quad (11)$$

де:

k_{nitr} – коефіцієнт пасивної нітрифікації, прийнято рівним 0,07.

Кількість амонійного Нітрогену, видаленого із скидною водою, визначатиметься коефіцієнтом повторного використання води та навантаженням у вигляді рідких метаболітів риб:

$$Outage_{NH_4} = Load_{fish} \cdot (1 - K_{circ}); \quad (12)$$

де:

K_{circ} – коефіцієнт повторного використання води у господарстві.

У процесі очищення оборотної води розчинені сполуки Нітрогену асимілюють рослини. Тому динаміка видалення амонійного Нітрогену з оборотної води буде визначатись загальною біомасою рослин, що приймають участь в очищенні води, та темпами їх росту:

$$Uptake_{NH_4} = \mu_l \cdot P_l \cdot \gamma_N / 0,78, \quad (13)$$

де:

μ_l – питомий приріст біомаси ряскових, $доб^{-1}$;

P_l – загальна біомаса рослин у фітореакторі, кг;

γ_N – вміст Нітрогену у сирій масі ряскових, г/кг;

0,78 – перевідний коефіцієнт для перерахунку на амонійний Нітроген.

Оскільки основною функцією фітореактора у технології багатостадійного очищення є забезпечення видалення сполук Нітрогену, що надходять в процесі вирощування риб, концентрація NH_4^+ в оборотній воді має залишатись в межах допустимого рівня:

$$dC_{NH_4}/dt = 0. \quad (14)$$

Забезпечення даної умови у балансовому рівнянні (1) матиме вигляд:

$$Load_{NH_4} = Uptake_{NH_4} + Rate_{nitr} + Outage_{NH_4}. \quad (15)$$

Для господарства, де коефіцієнт повторного використання води становить $K_{circ}=0,9$, з урахуванням попередніх перетворень, отримаємо:

$$Load_{NH4} = Uptake_{NH4} + 0,07Load_{NH4} + 0,1 Load_{fish} . \quad (16)$$

Отже, очисна потужність біореактора має відповідати прогнозованому навантаженню за амоній-йоном:

$$\begin{aligned} Uptake_{NH4} &= Load_{NH4} - 0,07Load_{NH4} - 0,1 Load_{fish} = \\ &= 0,93 Load_{NH4} - 0,1 Load_{fish} . \end{aligned} \quad (17)$$

Таким чином, отримуємо:

$$\mu_l \cdot P_l \cdot \gamma_N / 0,78 = 0,037F - 0,003 F = 0,034 F . \quad (18)$$

Відповідно, зв'язок між обсягами згодованого рибакомбікорму та очисною потужністю біореактора має вигляд:

$$F = \mu_l \cdot P_l \cdot \gamma_N / 0,0265 . \quad (19)$$

Вміст Нітрогену у хімічному складі ряскових коливається в обмеженому діапазоні та залежить від умов культивування. Тому в умовах фітореактора для очищення УЗВ γ_N залишається незмінним та може бути прийнятним рівним 4,8 г/кг (за усередненими даними [11–13]). Відповідно, необхідна кількість ряскових для нейтралізації потенційного навантаження за амонійним Нітрогеном (за умови достатнього часу контакту з водою) буде залежати від темпів приросту біомаси рослин в умовах біореактора:

$$P_l = 0,0265F / (\mu_l \cdot \gamma_N) = 5,52F / \mu_l . \quad (20)$$

Як видно з даного рівняння, питомий приріст ряскових фактично визначатиме очисну потужність фітореактора за Нітрогеном, адже нарощування біомаси на одиниці площі обмежене фізичними чинниками та морфологією рослин. Створення умов, за яких культивовані рослини проявлять максимальні темпи росту, забезпечить максимальну очисну потужність фітореактора. Отже, необхідно проаналізувати основні фактори, що впливають на ріст рослин у споруді. Темпи росту рослин в умовах фітореактора визначатимуться комплексом функцій:

$$\mu_l = \mu_{max} \cdot f(B) \cdot f(T) \cdot f(I) \cdot f(h), \quad (21)$$

де:

μ_{max} – максимальна швидкість росту, при культивуванні ряски малої в умовах УЗВ отримано: $\mu_{max} = 0,5 \text{ доб}^{-1}$;

$f(B)$ – функція, що визначає лімітування росту рослин вмістом поживних речовин та біогенних елементів;

$f(I)$ – функція, що враховує вплив інтенсивності освітлення;

$f(T)$ – функція, що враховує температурний фактор;

$f(h)$ – функція, що враховує тривалість періоду освітлення.

Оскільки вплив даних чинників має мультиплікаційну дію, при культивуванні рослин у фітореакторі неможливо буде компенсувати негативний вплив одного з факторів покращенням якогось іншого. Тому забезпечення належної інтенсивності видалення амонійного Нітрогену можливе лише при наближенні до оптимальних основних параметрів культивування.

Оскільки основними біогенними елементами, що визначають динаміку приросту водних макрофітів, є Нітроген та Фосфор, а функція лімітування буде здійснюватись лише одним із них, функція матиме вигляд:

$$f(B) = \left\{ \frac{B_N^2}{K_N^2 + B_N^2} \mid \frac{B_P^2}{K_P^2 + B_P^2} \right\}, \quad (22)$$

де:

B_N, B_P – концентрації у воді доступного Нітрогену та Фосфору, мг/дм³;

K_N^2, K_P^2 – константи напівнасичення, відповідно по Нітрогену та Фосфору.

При очищенні оборотної води УЗВ основну увагу приділяють найбільш токсичним для риб забрудненням – Нітрогену у формі амоній-йону або аміаку, тому в умовах фітореактора бажаним є, щоб лімітування росту рослин здійснювалось саме Нітрогеном. Фактично це означатиме, що ефект очищення за амонійним Нітрогеном буде наближатись до 100%. При цьому залишкові концентрації інших біогенних елементів не спричинятимуть небезпеки для риб та можуть залишатись у оборотній воді на рівні фонових. Константи напівнасичення за Нітрогеном згідно з даними різних авторів можуть коливатись в межах 0,15–0,3, тому за умови надходження у фітореактор забрудненої оборотної води із середніми концентраціями амонійного Нітрогену в межах 2–8 мг/л: $f(B) = 0,87-0,98$, для розрахунків прийємо рівним 0,95.

Оскільки температурний діапазон більшості тепловодних УЗВ не перевищує меж оптимуму для ряскових, функція температурного лімітування матиме вигляд:

$$f(T) = \exp \left(-2,3 \left(\frac{T_{opt} - T}{T_{opt} - T_{min}} \right)^2 \right). \quad (23)$$

При описі залежності приросту біомаси ряскових від інтенсивності освітлення розсіюванням світла у товщі води можна знехтувати, адже шар ряски знаходиться на її поверхні. Функція лімітування світлом представлена у вигляді:

$$f(I) = A_I \cdot \frac{I_z}{I_{opt}} \cdot \exp \left(1 - \frac{I_z}{I_{opt}} \right); \quad (24)$$

де:

A_I – коефіцієнт, що враховує особливості спектра джерела освітлення та відповідність довжини хвилі оптимальному діапазону для даного виду;

I_z – значення інтенсивності освітлення поверхні, Лк;

I_{opt} – оптимальна для даного виду інтенсивність освітлення, Лк.

На основні аналізу джерел літератури, присвячених дослідженню культивування ряскових у штучних умовах [11, 12], можна зробити припущення, що дефіцит тривалості освітлення призведе до уповільнення темпів росту, пропорційного різниці оптимального діапазону та наявної тривалості. При цьому тривалість освітлення понад оптимальний період лише незначною мірою уповільнить темпи росту рослин порівняно із максимально можливими:

$$f(h) = \begin{cases} h_z/h_{opt}, & h < h_{opt} \\ 2h_{opt}/(h_{opt} + h_z), & h \geq h_{opt} \end{cases}; \quad (25)$$

де:

h_{opt} – оптимальний для даного виду період освітлення, год/доб;

h_z – тривалість періоду освітлення, год/доб.

Забезпечувати тривалість освітлення, що перевищує межі оптимальних значень, є нераціональним кроком, тому для опису лімітування росту тривалістю освітлення використовується лише складова, що передбачає зниження тривалості відносно оптимального періоду.

Відповідно, залежність приросту біомаси ряскових від абіотичних факторів набуде вигляду:

$$\mu_1 = 0,5 \cdot 0,95 \cdot \exp\left(-2,3 \left(\frac{T_{opt}-T}{T_{opt}-T_{min}}\right)^2\right) \cdot A_I \cdot \frac{I_z}{I_{opt}} \cdot \exp\left(1 - \frac{I_z}{I_{opt}}\right) \cdot h_z/h_{opt}. \quad (26)$$

Підбір спектра джерел штучного освітлення та забезпечення необхідного рівня інтенсивності в умовах фітореактора дозволяють уникнути лімітування за даним фактором: $f(I) \approx 1$. За умови підтримки температури води від 20°C до 28°C можна припустити також, що $f(T) \approx 1$. Таким чином, в наближених до оптимальних умовах, вираз (26) прийме вигляд:

$$\mu_1 = 0,475 \cdot h_z/h_{opt}. \quad (27)$$

Відповідно, взаємозв'язок між необхідною біомасою ряскових та кількістю згодованих кормів визначатиметься залежністю:

$$P_t = 11,62 \cdot F\left(h_{opt}/h_z\right). \quad (28)$$

Таким чином, необхідна для асиміляції сполук Нітрогену та Фосфору біомаса ряскових визначатиметься кількістю внесеного у систему корму та тривалістю періоду природного або штучного освітлення. Розрахунок необхідної біомаси ряскових при використанні кормів, що відрізняються за своїми якісними характеристиками від кормів провідних європейських виробників, має бути скоригований поправочним коефіцієнтом. Цей коефіцієнт має враховувати кількість амонійного Нітрогену, який додатково

виділиться у процесі окиснення мікробіотою пилоподібних часток, неперетравлених залишків кормів. Аналітичним шляхом таке навантаження розрахувати вкрай складно, тому більш раціональним є визначення поправочного коефіцієнта для кожного окремого випадку в процесі експериментальних досліджень.

3. Висновки та рекомендації

Основною задачею оптимізації роботи очисних споруд у складі УЗВ є зниження витрат на очищення оборотної води за умови досягнення необхідного ефекту видалення основних забруднень. Стосовно процесів асиміляції рослинами фітореактора сполук Нітрогену, відповідно до отриманих рівнянь, найбільш впливовими будуть наступні фактори: температура води, інтенсивність та тривалість періоду освітлення, наявність поживних речовин у необхідних для збалансованого живлення кількостях. Аналіз концентрацій основних розчинених забруднень оборотної води УЗВ підтверджує можливість ефективного культивування в таких умовах окремих видів ряскових. Температура води є тим параметром, зміна якого з метою інтенсифікації процесів очищення води у фітореакторі є нераціональною. По-перше, для більшості ряскових температура води тепловодних УЗВ знаходиться в межах оптимальних значень. Витрати на підігрів води в УЗВ з помірним температурним режимом (осетрові господарства) можуть бути виправданими лише при зниженні температури оборотної води нижче 8°C, що пов'язано з припиненням росту рослин за таких температур. Водночас, й темпи росту осетрових суттєво уповільнюються при зниженні температури води у басейнах до вказаного значення, що обґрунтовує доцільність підігріву її у рибницькій системі.

Інтенсивність освітлення є фактором, який в умовах фітореактора для ряскових раціонально підтримувати в межах оптимальних значень, що обґрунтовується експоненціальною складовою у функції (24). В окремих випадках, за потреби знизити очисну потужність фітореактора при зменшенні обсягів забруднень оборотної води УЗВ, зміна інтенсивності освітлення при підтримці заданої біомаси рослин може розглядатись як спосіб зниження енерговитрат на очищення води. При використанні для освітлення фітореактора люмінесцентних ламп зміна даного параметру можлива лише при відключенні частини світильників. Таким чином, люмінесцентні джерела світла не дозволяють ефективно регулювати інтенсивність освітлення. На противагу ним, світлодіодні лампи характеризуються можливістю регулювання яскравості, але для цього необхідно використання додаткового обладнання, що призводить до підвищення вартості самої системи. Більш раціональним шляхом регулювання асиміляційної активності рослин є зміна тривалості світлового періоду, яка може бути ефективно реалізована при використанні будь-яких джерел інсоляції. Оскільки, як зазначено вище, збільшувати тривалість освітлення понад межі оптимуму нераціонально, даний чинник може розглядатись лише для обґрунтованого зниження темпів росту ряскових. Водночас, в умовах фітореактора недопустимим є зниження тривалості освітлення менше ніж 6 годин на добу, що пов'язано з динамікою надходження сполук Нітрогену у оборотну воду та особливостями фотосинтетичної активності рослин. Відповідно, подовження періоду

освітлення до оптимальних значень дозволить збільшити до максимального рівня очисну потужність фітореактора й пропорційно скоротити необхідну площу під нього. За умови наявності вільних площ в межах виробничого комплексу більш раціональним рішенням буде пропорційне скорочення тривалості періоду освітлення, що дасть можливість знизити витрати на електроенергію.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. L. Sabliy, S. Konontsev, J. Grokhovska, M. Widomski, et. al. Nitrogen removal from fish farms water by Lemna minor and Wolffia arrhiza. Proceedings Society of Ecological Chemistry and Engineering (SEChE). Opole (Poland). 2016. Vol. 10. No. 2. P. 499-504.
2. Zirschky J., Reed S.C. The use of duckweed for waste-water treatment Journal Water Pollution Control Federation. 1988. 60 (1). P. 1253-1258.
3. El-Kheir W.A., Ismail G., El-Nour A., Tawfik T. and Hammad, D. Assessment of the efficiency of duckweed (Lemna gibba) in wastewater treatment. International Journal of Agriculture and Biology. 2007. 5. P. 681-689.
4. El-Shafai S.A., El-Gohary F.A., Nasr F.A., Van Der Steen, et. al. Nutrient recovery from domestic wastewater using a UASB-duckweed ponds system. Bioresour. Technol. 2007. 98. P. 798-807.
5. Xu J., Shen G. Growing duckweed in swine wastewater for nutrient recovery and biomass production. Bioresour. Technol. 2011. 102. P. 848-853.
6. Frederic M., Samir L., Louise M., and Abdelkrim A. Comprehensive modeling of mat density effect on duckweed (Lemna minor) growth under controlled eutrophication. Water Research. 2006. Vol. 40. P. 2901-2910.
7. Hillman W. S. and Culley Jr, D. D. The uses of duckweed: The rapid growth, nutritional value, and high biomass productivity of these floating plants suggest their use in water treatment, as feed crops, and in energy-efficient farming. American Scientist. 1978. Vol. 66. No. 4. P. 442-451.
8. Ge X., Zhang N., Phillips G. C., Xu J. Growing Lemna minor in agricultural wastewater and converting the duckweed biomass to ethanol. Bioresource Technology. 2012. Vol. 124. P. 485-488.
9. 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.
10. Crab R., Avnimelech Y., Defoirdt T., Bossier P. et al. Nitrogen removal techniques in aquaculture for a sustainable production . Aquaculture. 2007. 270. P. 1-14.
11. Leng R. A., Stambolie J. H., Bell R. Duckweed – a potential high-protein feed resource for domestic animals and fish. Livestock Research for Rural Development. 1995. Vol. 7. Available at: <http://www.fao.org/ag/aga/agap/frg/lrrd/lrrd7/1/3.htm>
12. Mkandawire M., Dudel E. Are Lemna spp. Effective Phytoremediation Agents? Bioremediation, Biodiversity and Bioavailability. 2007. 1. P. 56-71.
13. Макрофиты – индикаторы изменений природной среды. Д. В. Дубына, С. М. Стойко, К. М. Сытник [и др.]; под ред. С. Гейны, К. М. Сытник. К.: Наук. думка, 1993. – 434 с.

Стаття надійшла до редакції 01.03.2018.