

## ВОДОПОСТАЧАННЯ ТА ВОДОВІДВЕДЕННЯ

УДК 628.35

**Кононцев С. В., к.т.н., доцент; Гроховська Ю. Р., д.с.-г.н., доцент** (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне); **Саблій Л. А., д.т.н., професор; Козар М. Ю., к.т.н.** (Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського»)

### АНАЛІЗ ВІДПОВІДНОСТІ СКЛАДУ ЗАБРУДНЕНЬ ОБОРОТНОЇ ВОДИ УЗВ ПОТРЕБАМ ВОДНИХ РОСЛИН У МАКРОЕЛЕМЕНТАХ

**Досліджено потреби ряскових у основних поживних елементах для збалансованого росту в умовах фітореактора для очищення оборотної води УЗВ. На основі аналізу складу основних забруднень води обґрунтовано можливість ефективного використання рослин для видалення розчинених сполук Нітрогену.**

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

**Вступ.** Сучасні прогресивні підходи до організації виробництва продукції аквакультури, викладені у концепції інтегрованої мультитрофічної аквакультури (ІМТА), передбачають вирощування в субкультурі з основними об'єктами (рибами) інших гідробіонтів, які здатні забезпечити деструкцію основних забруднень води та, водночас, мають харчову цінність. Особливої актуальності дане питання набуває в марікультурі, оскільки зі зростанням обсягів вирощування пропорційно збільшується й забруднення акваторій. У прісноводних УЗВ мультитрофічні комплекси також мають широкі перспективи, адже вони дозволяють суттєво знизити залежність від природного джерела водопостачання, забезпечити раціональніше використання кормів та мінімізувати негативний вплив на навколишнє природне середовище. До того ж, в замкнутому контурі водопостачання створюються умови для ефективного залучення до процесів очищення води різних груп очисних агентів. Одними з перших прикладів реалізації концепції інтегрованої мультитрофічної аквакультури в умовах УЗВ можна назвати системи аквапоніки, де відбувається видалення з оборотної води сполук Нітрогену та Фосфору завдяки асиміляції їх рослинами.

**Аналіз останніх досліджень.** Досвід впровадження систем аквапоніки в умовах прісноводної та морської індустріальної аквакультури підтвердив їх ефективність у порівнянні з технологією нітри-

денітрифікації [1; 2]. Водночас, експлуатація системи аквапоніки супроводжується рядом проблемних аспектів, які пов'язані з коливаннями очисної потужності внаслідок зміни інтенсивності живлення рослин, необхідністю підживлення рослин дефіцитними макро- та мікроелементами [3; 4]. Одним з альтернативних рішень щодо видалення сполук Нітрогену та Фосфору в умовах мультитрофічної аквакультури є залучення до процесів очищення оборотної води вільноплаваючих водних рослин, зокрема – ряскових. З точки зору ІМТА, дана група може ефективно використовуватись для годівлі риб, що забезпечить трансформацію сполук Нітрогену та Фосфору в доступну для споживання рибами фітомасу. Використання в процесах очищення ряскових має й ряд технологічних переваг, які пов'язані з простотою їх утримання у фітореакторі, високими темпами росту, зручністю видалення надлишкової маси та підтримки заданої біомаси у споруді [5]. Розміри рослин та їх склад дозволяють використовувати сиру фітомасу для годівлі риб без будь-якої попередньої обробки. Оскільки більшість культур аквапоніки потребують повного видалення рослин після завершення етапу плодоношення або нарощування зеленої маси, система аквапоніки буде характеризуватись нестабільною роботою, потребою в постійному нагляді та кваліфікованому персоналі. Тому особливої актуальності набуває використання ряскових у господарствах з невеликою виробничою потужністю, адже ці рослини стабільно нарощують фітомасу, яку можна видаляти частково.

Принципова можливість культивування ряскових у забрудненій воді рибницьких господарств підтверджена для ветландів та біоставів [6; 7]. Тому в штучно створених контрольованих умовах УЗВ очисний потенціал даних рослин може бути використаний у повній мірі. На темпи росту рослин та, відповідно, на інтенсивність асиміляції сполук Нітрогену будуть впливати ряд біотичних та абіотичних факторів, серед яких найважливішими є температура води, параметри освітлення, наявність у необхідних кількостях макро- та мікроелементів. Згідно досліджень [8], температура води тепловодних УЗВ оптимальна для росту ряскових; зазначені як оптимальні параметри освітлення (яскравість, тривалість світлового дня, спектр) можуть бути ефективно забезпечені за рахунок штучної інсоляції. Водночас, в умовах фітореактора з рясковими нестача будь-якого з елементів живлення навіть при оптимальних параметрах середовища буде лімітувати швидкість видалення найнебезпечнішого для риб амонійного Нітрогену.

#### **Метою**

**да-**

є аналіз забезпеченості макро- та мікроелементами ряскових при їх

культивуванні в очисних спорудах УЗВ для очищення оборотної води від сполук Нітрогену.

**Результати досліджень.** Спектр сполук та елементів, які рослини засвоюють у процесі росту та розмноження, є доволі широким. Позитивною рисою таких властивостей метаболізму рослин є можливість видалення з оборотної води, окрім основного забрудника – амонійного Нітрогену, інших розчинених забруднень, притаманних рибницьким господарствам – фосфатів, сполук Калію та Натрію, Кальцію та Магнію. Щоб визначити, чи будуть достатніми концентрації таких елементів у оборотній воді для збалансованого живлення рослин, необхідно провести аналіз хімічного складу перспективних для культивування видів та дослідити зміни концентрацій окремих сполук у процесі очищення води в фітореакторі. Попри те, що хімічний склад не віддзеркалить точну потребу рослини у поживних елементах, на основі такого аналізу можна зробити висновки про межі оптимального для даного виду співвідношення елементів у доступній формі та добову потребу в них. Відповідно до хімічного складу ряскових, який представлено у табл. 1, можна виділити найвагоміші у розвитку рослин елементи та їх оптимальне співвідношення.

Сполуки Фосфору, які разом з сполуками Нітрогену складають основну частину забруднень оборотної води, виділяються рибами як у розчиненій, так і у нерозчиненій формі. Частина нерозчинених сполук Фосфору через відносно короткий час перебування у воді (в межах 1-2 годин) може перейти у доступну для рослин форму фосфатів. З огляду на те, що в хімічному складі ряскових кількість Фосфору коливається в межах 0,8-1% від абс. сух. реч., для забезпечення збалансованого живлення рослин співвідношення Нітрогену і Фосфору має бути в межах 3,2-5,5. Відхилення у менший бік не уповільнить процес видалення амонійного Нітрогену, але створить тенденцію до накопичення фосфатів у воді. Дане питання потребує глибшого дослідження, адже в умовах інтенсивного забруднення води фосфатами та під час культивування ряски у воді з концентрацією загального Фосфору в межах 1-3 мг/дм<sup>3</sup> ряска виявляє здатність до накопичення Фосфору до 10-14 мг/г абс. сух. реч., що у перерахунку на відсотки становить близько 1,5% від сухої маси [9]. Ймовірно, що така властивість дозволяє рясковим нагромаджувати певний енергетичний потенціал, адже Фосфор включається до складу нуклеотидів клітини та забезпечує енергетичні функції рослини. Згідно з аналітичними даними [10; 11], співвідношення Нітрогену і Фосфору у розчинених забрудненнях оборотної води коливається в межах 12-17, що створює потенційні умови для лімітування росту ряскових Фосфором при очищенні води в фітореакторі.

Таблиця 1

## Вміст основних макроелементів у фітомасі ряскових

Елемент	Од. виміру	Вид рослини	Умови зростання	Значення	Джерело
N	мг/г сух. маси	<i>Lemna minor</i> L.	Культуральне середовище	60	[13]
	%			5,2	[14]
	мг/г	Суміш ряскових	Природні умови	2,59	[12]
	%	<i>Lemna trisulca</i> L.	Природні умови	1,53- 4,59	[15]
P	мг/г сух. маси	<i>L. minor</i>	Культуральне середовище	5-14	[13]
	%			10-14	[10]
	%		Природні умови	0,8	[15]
			Аквакультура	1	[14]
	%	<i>L. trisulca</i>	Природні умови	0,78	[15]
	мг/г	Суміш ряскових	Природні умови	0,81	[12]
Ca	%	<i>L. minor</i>	Культуральне середовище	10	[13]
			Аквакультура	5,3	[14]
	%	<i>L. trisulca</i>	Природні умови	0,18- 3,82	[15]
Mg	мг/г	<i>L. minor</i>	Культуральне середовище	6	[13]
	%		Аквакультура	0,5	[14]
	%	<i>L. trisulca</i>	Природні умови	0,256	[15]
K	мг/г	<i>L. minor</i>	Культуральне середовище	40	[13]
	%		Аквакультура	3,3	[14]
	%	<i>L. trisulca</i>	Природні умови	4	[15]
Fe	мг/г	<i>L. minor</i>	Культуральне середовище	2,4	[13]
			Природні умови	0,49	[14]
Na	мг/л	<i>L. minor</i>	Культуральне середовище	3,25	[13]
		<i>L. trisulca</i>	Природні умови	0,52	[15]

Раціональним рішенням для оптимального співвідношення даних біогенних елементів у доступній для рослин формі є забезпечення надходження в розчин фосфатів з нерозчинених забруднень, які містяться у воді. Доцільність такого кроку обґрунтовується потенційною цінністю Фосфору як біогенного елемента та низькою ефективністю видалення завислих домішок в умовах УЗВ. Достовірність висловлених припущень підтверджується аналізом показників забруднень оборотної води УЗВ з традиційною технологією водоочищення, –

концентрації фосфатів у ній досягають значень у  $24 \text{ мг/дм}^3$  і вище. Отже, значна частина нерозчинених сполук Фосфору, які містяться в зв'язаному стані (в фекаліях риб та у вигляді завислих речовин), потенційно здатна компенсувати такий дефіцит та забезпечити збалансований ріст рослин. Кількість фосфатів, яка потенційно може перейти у розчинену форму, залежить від складу нерозчинених домішок, який, у свою чергу, зумовлений особливостями метаболізму об'єкта вирощування та характеристиками кормів. Також надходження фосфатів з твердих забруднень може відбуватись внаслідок їх деструкції іншими очисними агентами, – у такому випадку розчинені сполуки Фосфору надходять у воду як метаболіти безхребетних тварин.

Враховуючи те, що Кальцій та Магній є важливими елементами для живлення риб, до складу комбікормів вводять необхідну кількість даних елементів у доступній рибам формі. Здебільшого потреба рослин у Кальції та Магнії перекривається їх надходженням з метаболітами риб, адже вміст Кальцію у більшості кормів складає 1-2%. Також рослини мають можливість асимілювати  $\text{Ca}^{2+}$  та  $\text{Mg}^{2+}$ , що надходять із підживлювальною водою.

Калій, який у організмі риб також відноситься до групи макроелементів, міститься переважно в складі борошна рослинного походження, яке складає основу більшості продукційних комбікормів. Сполуки Калію не становлять потенційної небезпеки для культивованих в УЗВ риб, тому при аналізі основних забруднень оборотної води детальні дослідження динаміки їх вмісту в контурі рибницького господарства не проводили. Оскільки даний елемент достатньо добре засвоюється рибами та виводиться переважно у нерозчиненому вигляді, його концентрація в оборотній воді може бути лімітуючою для розвитку ряскових. Калій є одним з елементів, які асимілюються рослинами у відносно великих кількостях, особливо під час плодоношення. Відповідно до аналізу хімічного складу ряскових, при наближених до максимальних темпах росту, на 1 кг живої ваги ряскових добова потреба у Калії становитиме 1,8-2,4 мг. У разі, якщо дана потреба буде покрита за рахунок надходження сполук Калію з метаболітами риб, доступних для рослин, даний елемент не буде лімітувати процеси видалення амонійного Нітрогену.

Експериментальні дослідження динаміки концентрації сполук Калію було проведено в умовах виробничої установки для очищення води осетрового господарства малої потужності (рисунок).

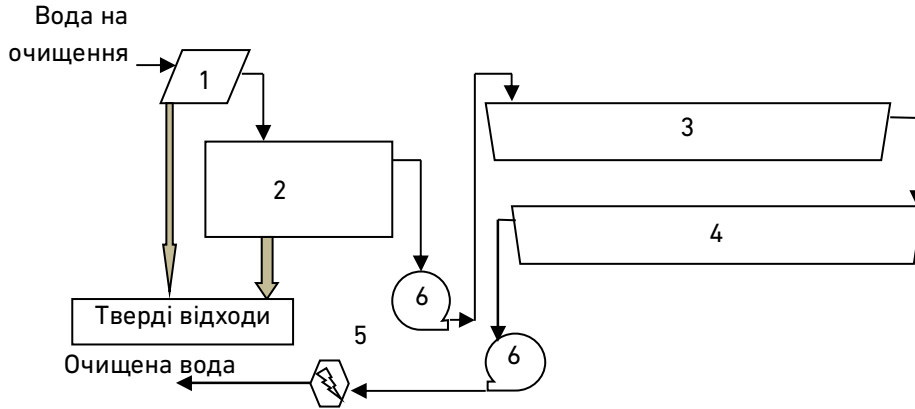


Рисунок. Схема виробничої установки для очищення оборотної води УЗВ з вирощування стерляді: 1 – сітчастий фільтр; 2 – біореактор з волокнистим носієм; 3 – фітореактор першого ступеня; 4 – фітореактор другого ступеня; 5 – ультрафіолетова установка; 6 – циркуляційний насос

Особливістю схеми очищення води у даному випадку є видалення сполук Нітрогену в двох послідовно з'єднаних фітореакторах. Отримані результати дозволяють зробити висновок, що кількість розчинених сполук Калію, яка надходить у воду разом з метаболітами риб, не лімітує видалення сполук Нітрогену в процесі їх асиміляції рослинами фітореактора. Виходячи з хімічного складу рослин (табл. 1) та концентрацій сполук Калію у забрудненій оборотній воді (табл. 2), можна зробити висновки, що даний макроелемент також міститься у надлишку.

Таблиця 2

Дослідження концентрації Калію у оборотній воді при годівлі кормом «Aller primo float» (УЗВ для вирощування стерляді)

Добова норма годівлі, %	Концентрація $\text{NH}_4^+$ на виході з басейнів, мг/л	Концентрація Калію, мг/л			
		На виході з басейнів	Після біореактора	Після фітореактора 1	Після фітореактора 2
2	0,9-1,7	1,5-2,2	1,8-2,3	1,1-1,6	0,5-0,9
1,5	0,4-1,1	1,6-2,4	1,8-2,9	1,3-2,0	0,7-1,8

Сучасні УЗВ, що забезпечують повторне використання води на рівні 95% і вище, характеризуються обмеженим надходженням з підживлювальною водою багатьох макро- та мікроелементів, що відіграють важливу роль не лише у метаболізмі рослин, а й у життєдіяльності риб. Тому, попри технічні можливості сучасної біотехнології вилучити з оборотної води більшість забруднень, детального вивчення потребує питання потенційного дефіциту окремих елементів, які не входять до складу корму. Стосовно підвищення надійності роботи фітореактора раціональним кроком є сумісне культивування в ньому

декількох видів, потреби яких у макро- та мікроелементах відрізняються.

**Висновки.** При культивуванні ряскових в умовах фітореактора створюються належні умови для збалансованого живлення рослин завдяки надходженню в оборотну воду в достатній кількості основних макроелементів: Фосфору, Калію, Кальцію та Магнію. Відповідно, ймовірність лімітування інтенсивності асиміляції амонійного Нітрогену будь-яким з вказаних елементів є низькою.

1. Watten B. J., Busch R. L. Tropical production of tilapia (*Sarotherodon aurea*) and tomatoes (*Lycopersicon esculentum*) in a small-scale recirculating water system // *Aquaculture*. – 1984. – 41. – P. 271–283. 2. Rakocy J. E., Shultz R. C., Bailey D. S., Thoman E. S. Aquaponic production of tilapia and basil: Comparing a batch and staggered cropping system // *Acta Hort.* – 2004. – 648. – P. 63–69. 3. Rakocy J. E. / *Aquaponics – Integrating Fish and Plant Culture* // Wiley-Blackwell: Hoboken. – USA, NJ. – 2012. – Pp. 344–386. 4. Проскуренко И. В. Замкнутые рыбоводные установки / И. В. Проскуренко. – ВНИРО. – Москва, 2003. – 152 с. 5. Nitrogen removal from fish farms water by *Lemna minor* and *Wolffia arrhiza* / L. Sabliy, S. Konontsev, Y. Grokhovska, M. Widomski and G. Lagod // *Proceedings Society of Ecological Chemistry and Engineering (SEChE), Proceeding of ECOpole*. – Opole (Poland), 2016. – Vol. 10. – 2. – P. 499–504. 6. Hassan M. S., Edwards P. / Evaluation of duckweed (*Lemna perpusilla* and *Spirodela polyrrhiza*) as feed for Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) // *Aquaculture*. – 1992. – Vol. 104. – Issue 3-4. – P. 315–326. 7. Zachritz W. H., Jacquez R. B. Treating intensive aquaculture recycled water with a constructed wetlands filter system. *Constructed Wetlands for Water Quality Improvement*. Moshiri, G. A., Ed.; Lewis Publishers: Boca Raton, FL, USA. – 1993. – P. 609–613. 8. Mkandawire M., Brackhage C., Taubert E., Dudel E. G. Semicontinuous culture systems for *Lemna gibba* bioassay: functioning and theory of operation // *Applied Ecology and Environmental Research*. – 2005. – #3. – P. 19–27. 9. Leng R. A., Stambolie J. H. and Bell R. Duckweed – a potential high-protein feed resource for domestic animals and fish // *Livestock Research for Rural Development*. – 1995. – V. 7 – Article #5. Retrieved February 2, 2016. – P. 100–117. – Available at : <http://www.lrrd.org/lrrd7/1/3.htm> 10. Hennessy M. M. / Predicting output of ammonium from fish farms // *Water Res.* – 1994. – 28. – P. 1403–1405. 11. Cripps S. J., Bergheim A. Solids management and removal for intensive land-based aquaculture production systems // *Aquacult. Eng.* – 2000. – 22. – P. 33–56. 12. Гроховська Ю. Р. Фітоаккумуляція макро- і мікроелементів – перспективи покращення якості поверхневих вод / Ю. Р. Гроховська, С. В. Кононцев // *Збірник статей науково-практичної конференції з міжнародною участю*. – Житомир, 2016. – С. 41–47. 13. Mkandawire M., Dudel E. Are *Lemna* spp. Effective Phytoremediation Agents? // *Bioremediation, Biodiversity and Bioavailability*. – 2007. – 1. – P. 56–71. 14. Landolt E. *Biosystematic investigations in the family of duckweeds (Lemnaceae) The family of Lemnaceae – a monographic study, Volume 1*. – 1986. – Zurich: Veroff. Geobot. Inst. ETH. – 638 pp. 15. 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.

Рецензент: д.с.-г.н., професор Клименко М. О. (НУВГП)

---

**Konontsev S. V., Candidate of Engineering (Ph.D.), Associate Professor**  
**Hrokhovska Y. R., Doctor of Agricultural Sciences, Associate Professor**  
(National University of Water and Environmental Engineering, Rivne);  
**Sablil L. A., Doctor of Engineering, Professor, Kozar M. Y., Candidate of Engineering (Ph.D.)** (National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv)

### **ANALYSIS OF SUITABILITY OF CIRCULATING WATER POLLUTION COMPOSITION IN RAS TO NEEDS OF AQUATIC PLANTS IN MACROELEMENTS**

**Duckweed needs in the main nutrient elements for balanced growth under phytoreactor conditions for RAS water treatment were investigated. Based on the analysis of the main water pollution composition, possibility of effective use of plants for remove nitrogen compounds is substantiated.**

**Keywords:** biological water treatment, RAS, removal of nitrogen compounds.

---

**Кононцев С. В., к.т.н., доцент; Гроховская Ю. Р., д.с.-г.н., доцент**  
(Национальный университет водного хозяйства и природопользования, г. Ровно); **Саблий Л. А., д.т.н., профессор;**  
**Козарь М. Ю., к.т.н.** (Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»)

### **АНАЛИЗ СООТВЕТСТВИЯ СОСТАВА ЗАГРЯЗНЕНИЙ ОБОРОТНОЙ ВОДЫ УЗВ ПОТРЕБНОСТЯМ ВОДНЫХ РАСТЕНИЙ В МАКРОЭЛЕМЕНТАХ**

**Исследованы потребности рясковых в основных питательных элементах для сбалансированного роста в условиях фитореактора для очистки оборотной воды УЗВ. На основе анализа состава основных загрязнений воды обоснована возможность эффективного использования растений для удаления растворённых соединений азота**

**Ключевые слова:** биологическая очистка воды, УЗВ, удаление соединений азота.

---