

С.В. КОНОНЦЕВ, кандидат технічних наук

Л.А. САБЛІЙ, доктор технічних наук

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені І. Сікорського»

Ю.Р. ГРОХОВСЬКА, кандидат сільськогосподарських наук

Національний університет водного господарства та природокористування,  
м. Рівне

## **ОЧИЩЕННЯ ВОДИ РИБНИЦЬКИХ ГОСПОДАРСТВ ІЗ ЗАМКНУТИМ ЦИКЛОМ ВОДОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВІД СПЛУК АМОНІЙНОГО НІТРОГЕНУ**

*Метою роботи є визначення елімінаційної потужності вищих водних рослин за сполуками нітрогену при очищенні води рибницьких господарств із замкнутим циклом водозабезпечення (УЗВ) та дослідження впливу окремих факторів на ефективність роботи фітореактору. У результаті досліджень було визначено динаміку росту ряскових в умовах фітореактору та елімінаційну потужність за нітрогеном *Wolffia arrhiza* (L.) та *Lemna minor* L.*

**Ключові слова:** біологічне очищення, фітореактор з рясковими, асиміляція нітрогену.

*Целью работы является определение элиминационной мощности высших водных растений с соединениями азота при очистке воды рыбоводческих хозяйств с замкнутым циклом водоснабжения (УЗИ) и исследование влияния отдельных факторов на эффективность работы фитореактора. В результате исследований была определена динамика роста рясковых в условиях фитореактора и элиминационная мощность по азоту *Wolffia arrhiza* (L.) и *Lemna minor* L.*

**Ключевые слова:** биологическая очистка, фитореактор с рясковыми, ассимиляция азота.

*The aim is to evaluate the elimination capacity of nitrogen compounds by higher aquatic plants for water purification in recirculation aquaculture systems (RAS) and study the influence of individual factors on the phytoreactor effectiveness. As a result of research was studied the dynamics of plants growth in the phytoreactor conditions, was determined the nitrogen elimination capacity *Wolffia arrhiza* (L.) Horkel ex Wimm and *Lemna minor* L.*

**Key words:** biological treatment, duckweed phytoreactor, nitrogen assimilation.

**Вступ** Індустріальні методи ведення господарства є одним із пріоритетних напрямків розвитку рибництва в Україні, саме вони мають

замістити архаїчні та неефективні технології, характерні для нашої держави сьогодні. Зокрема, передовий досвід більшості розвинутих країн підтверджує перспективність вирощування гідробіонтів в установках із замкнутим циклом водозабезпечення (УЗВ). Одною із ключових умов високої рентабельності таких господарств є забезпечення ефективного та енергоощадливого очищення забрудненої у басейнах води для можливості її повторного використання. Більшість біотехнологій відновлення якості циркуляційної води УЗВ базуються на використанні багатоступеневого очищення у біофільтрах, де завдяки мікрофлорі поетапно відбуваються процеси нітрифікації та денітрифікації. Основні проблемні аспекти реалізації такої технології при очищенні води УЗВ, викладені у працях закордонних науковців [1,367; 2,76; 3,84-85], суттєво відображаються на собівартості продукції та потребують комплексного вирішення. Розробка нових, більш ефективних технологій, пристосованих до умов УЗВ, дасть додатковий стимул для розвитку даної галузі рибництва в Україні.

**Постановка завдання** Оскільки видалення із забрудненої води УЗВ розчинених сполук нітрогену шляхом нітрифікації із подальшою денітрифікацією відбувається неефективно та характеризується значними поточними витратами (необхідність коректування рН після кожної стадії очищення, подачі метанолу чи іншого джерела Карбону), актуальним є пошук альтернативних біотехнологій. В результаті аналізу процесів самоочищення водойм та особливостей метаболізму окремих гідробіонтів було виявлено, що вилучення основних біогенних елементів із води УЗВ з використанням вищих водних рослин є перспективним методом очищення, який розглядається як один з пріоритетних напрямків у інтегрованих рибницьких системах [3,86]. Обґрунтованість таких висновків підтверджує практика експлуатації ветландів для очищення води рибницьких господарств [4,845]. В умовах закритого приміщення, де температурний режим басейнів підтримується у заданому діапазоні незалежно від пори року, для відновлення якості води доцільно використовувати не повітряно-водні, а водні не укорінені рослини. Вибір саме ряскових для залучення у процеси очищення циркуляційної води УЗВ пов'язаний із швидкими темпами метаболізму рослин, тобто високою потенційною очисною здатністю; зручністю їх культивування у проточній споруді (відсутня проблема затримання та повернення у реактор, що характерна при культивуванні мікроводоростей) та можливістю ефективного використання приросту біомаси в якості кормів для риб [5,90].

**Результати досліджень** У мету досліджень входило підтвердження можливості культивування ряскових у спорудах біологічного очищення циркуляційної води УЗВ, пошук найбільш придатних для вирощування видів, визначення потенційної елімінаційної потужності рослин в умовах штучної екосистеми – фітореактору. Асиміляційну потужність за Нітрогеном будь-якої рослини можна визначити, виходячи з її біохімічного складу та динаміки приросту фітомаси. При цьому важливою умовою для максимального темпу росту рослин є забезпечення оптимальних умов культивування: належного освітлення та температури в межах оптимуму для даного виду. Тому, з точки

зору технології водоочищення в очисних спорудах доцільним є культивувати рослини, що характеризуються швидкими темпами росту та здатні пристосовуватись до штучних умов вирощування. Основними пріоритетами при виборі видів рослин для вирощування в умовах УЗВ були наступні: рівномірні темпи росту протягом року, стійкість до характерних забруднень, високі темпи росту та можливість ефективної утилізації приросту біомаси рослин.

Після детального аналізу різних факторів найбільш перспективними для вирощування в УЗВ виявились ряска мала (*Lemna minor* L.) та вольфія (*Wolffia arrhiza* (L.) Horkel ex Wimm). Дані види показали найкращу пристосованість до умов вирощування на забрудненій воді із рибницьких басейнів, що відобразилось на темпах розмноження рослин порівняно із іншими досліджуваними видами: ряскою триборозенчастою (*Lemna trisulca* L.), спіроделою (*Spirodela polyrrhiza* (L.) Schleid.) (рис. 1).

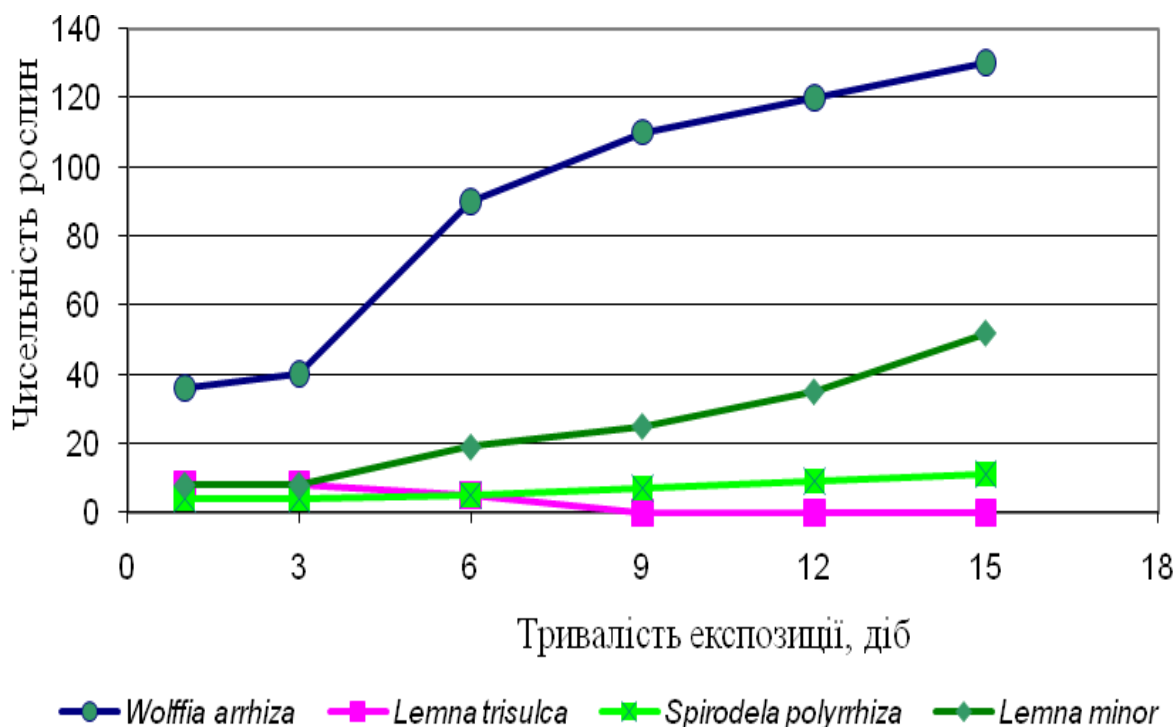


Рис. 1. Динаміка росту досліджених представників рясових у непроточних умовах

Значна перевага у чисельності вольфії зумовлена порівняно малими лінійними розмірами даної рослини (0,5...1,5 мм). Водночас, швидкості подвоєння біомаси ряски малої та фольфії були приблизно рівними, що підтверджено також в умовах проточної установки на моделі фітореактору (рис.2). Оскільки інші види характеризувались гіршою пристосованістю до параметрів досліджуваної води та проявили менш інтенсивні темпи росту, у подальших дослідженнях їх не культивували.

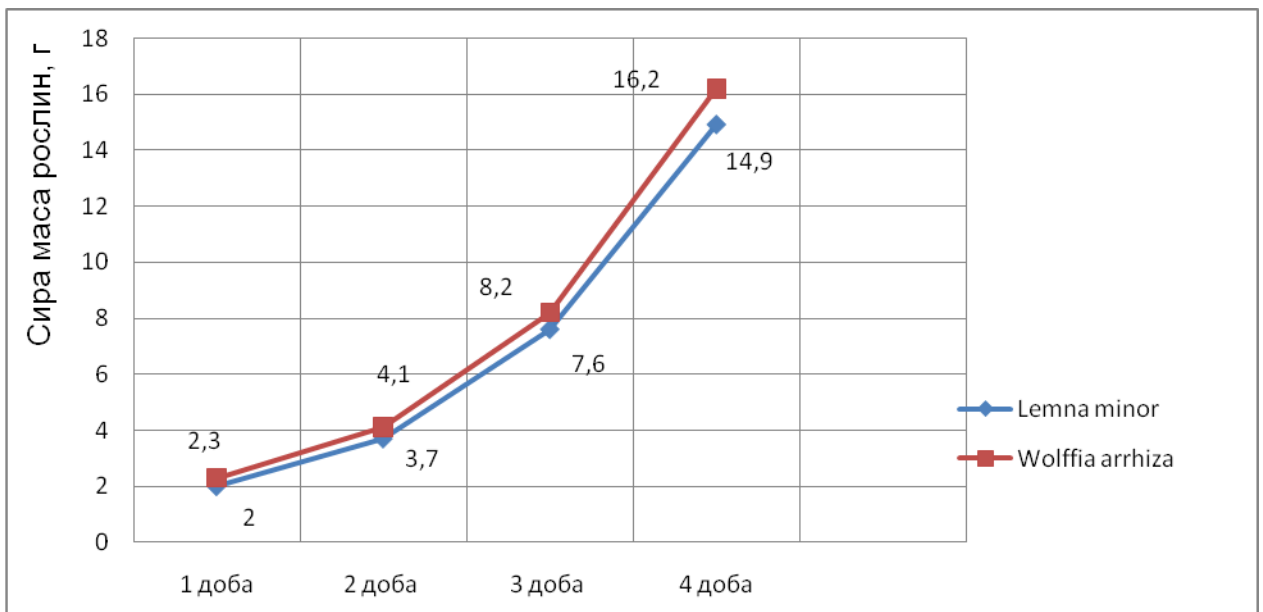
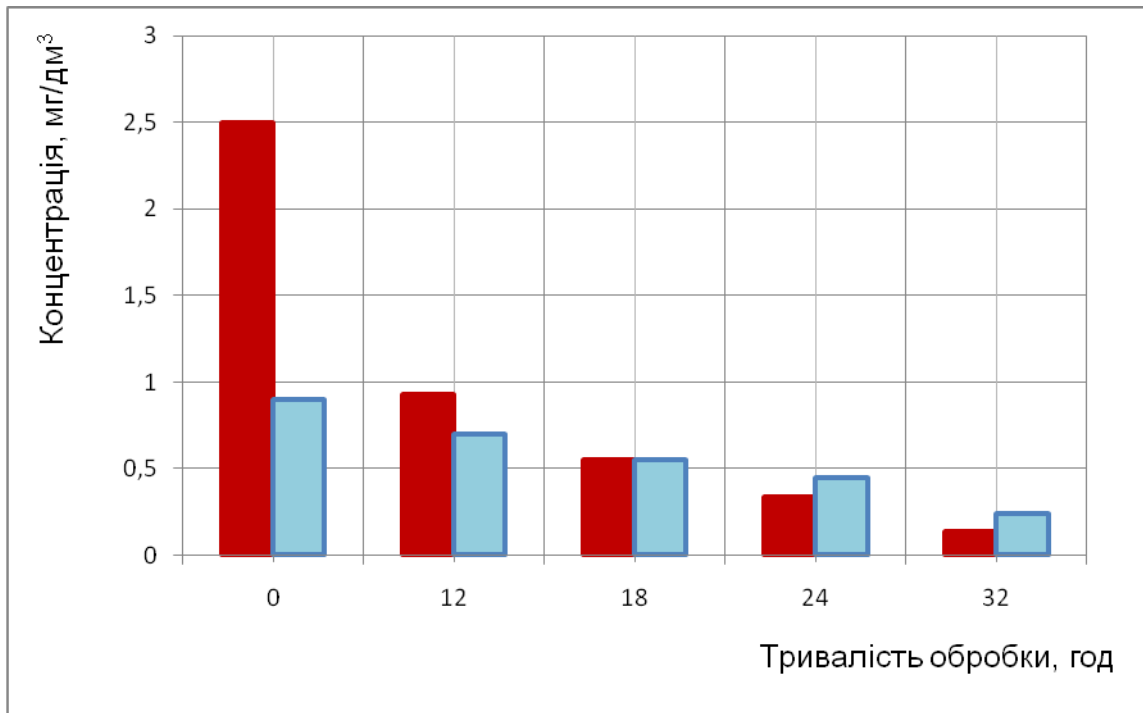


Рис.2. Динаміка росту ряски та вольфії в умовах проточного фітореактору

Очисна потужність фітореактору, що може бути приведена до одиниці площі споруди, залежатиме від щільності посадки біомаси рослин. У процесі досліджень встановлено, що на 1 м<sup>2</sup> поверхні може знаходитись 4...10 кг живої ваги рослин, адже максимальна щільність посадки потребує інтенсивного освітлення та забезпечення повільного перемішування верхніх шарів води. Для визначення потенційної асиміляційної здатності за Нітрогеном, приведеної до одиниці сирової маси рослин, було проведено дослідження на реальних стічних водах рибницького господарства в умовах проточного фітореактору.

В умовах фітореактору було досліджено процес асиміляції ряскою малою основної розчиненої забруднюючої речовини у воді УЗВ – амонійного Нітрогену; при цьому контролювали концентрацію у воді нітратів (рис. 3). Така методика дозволила стверджувати, що амонійний Нітроген був асимільований рослинами, а не трансформувався у нітрати завдяки наявній у воді мікрофлорі. Експериментально підтверджено також, що рослини активно асимілюють Нітроген і у формі нітрат-іону.

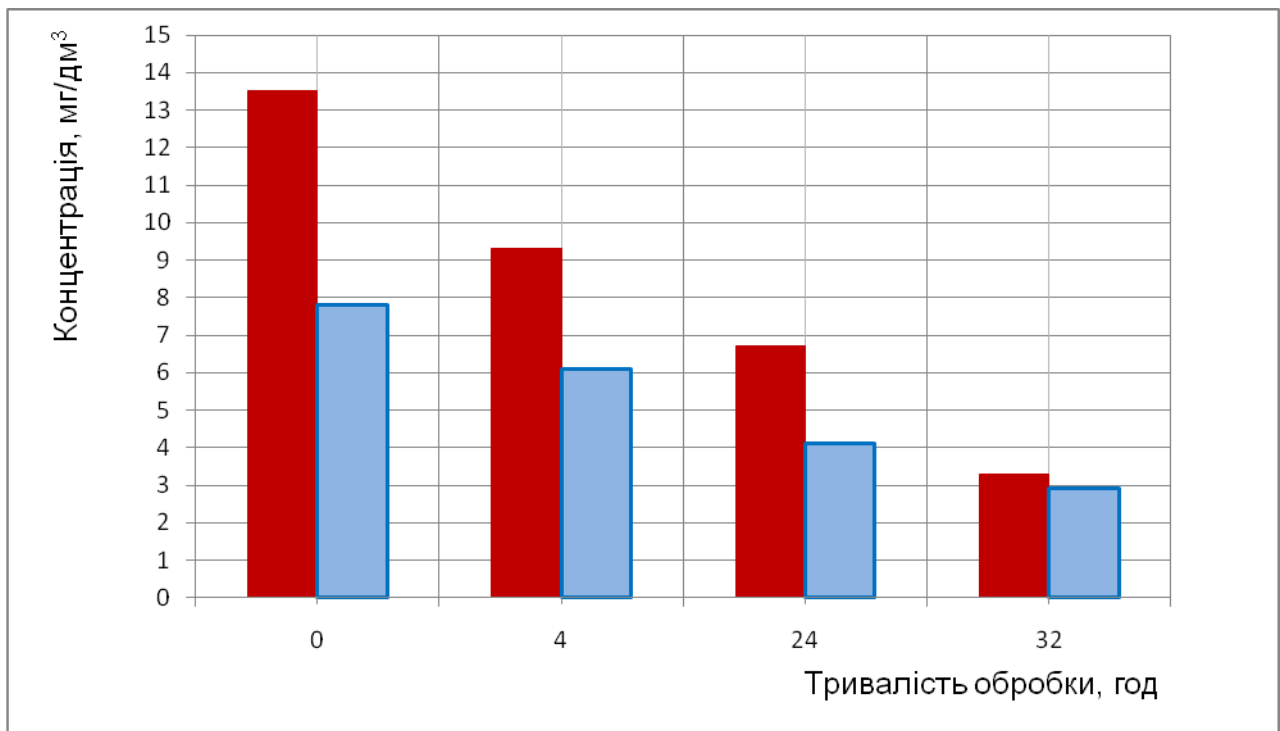
У процесі попередніх досліджень пристосування ряскових до органічного забруднення було виявлено, що вольфія проявляє вищі темпи росту при порівняно високих концентраціях органічних сполук, фосфатів та амонійного Нітрогену. Відповідно, для дослідження асиміляційної потужності вольфії (рис. 4) використали найбільш забруднені проби води, характерні для басейнів із надвисокими щільностями посадки риб та інтенсивною годівлею. Незначні концентрації у даних пробах нітрат-іонів пов'язані із тим, що внаслідок неефективної роботи біофільтра значна частина забрудненої води скидалась, а циркуляційний контур поповнювався чистою водою з підземного джерела водопостачання. Водночас, накопичення амоній-іонів відбувалось відразу ж у басейнах внаслідок метаболізму риб.



 -  $\text{NH}_4^+$

 -  $\text{NO}_3^-$

Рис. 3. Асиміляція розчинених форм Нітрогену ряскою малою



 -  $\text{NH}_4^+$

 -  $\text{NO}_3^-$

Рис. 4. Асиміляція розчинених форм Нітрогену вольфією

Основні параметри, що впливатимуть на ефективність роботи споруди визначають відповідно до особливостей роботи УЗВ, спектру забруднень води рибницьких басейнів і вимог до якості води, що використовують повторно. Найбільш вагомими серед них є наступні: тривалість та інтенсивність освітлення; фізико-хімічні показники забрудненої води; коливання концентрацій основних забруднень; необхідний ступінь очищення; гідравлічний режим господарства та споруд біологічного очищення.

Очисну здатність фітореактору за розчиненими сполуками амонійного Нітрогену та Фосфору можна оцінити безпосередньо за приростом біомаси очисних агентів, адже нарощування білкової маси рослини прямолінійно залежить від швидкості асиміляції основних мікроелементів, до яких належать Нітроген і Фосфор. Необхідно зазначити, що максимальні темпи росту (найвищу очисну потужність) можна досягти лише при забезпеченні всіх необхідних параметрів культивування. Більшість факторів, що впливають на темпи зростання ряскових, безпосередньо пов'язані із фізико-хімічними показниками забрудненої у басейні води. Оскільки при вирощуванні риб у штучно створених системах із замкнутим колом водозабезпечення лімітуючими забрудненнями є сполуки Нітрогену (йони амонію та нітриту), саме на зниження їх концентрацій до допустимих меж і розраховується потужність фітореактору. Експериментальні дослідження у виробничих умовах підтвердили задовільне пристосування ряски та вольфії до концентрацій фосфатів та сполук Нітрогену, що значно перевищують допустимі межі для риб. Темпи росту рослин практично не змінювались у достатньо широкому діапазоні коливань амонійного Нітрогену ( $2 \dots 35 \text{ мг/дм}^3$ ), тоді як для більшості культивованих видів риб концентрації амонію у  $0,5 \dots 2,5 \text{ мг/дм}^3$  є гранично допустимими. Оскільки у процесі метаболізму ряскової асимілюють із води фосфати, нітриту та нітрати, у процесі експлуатації фітореактору концентрації цих сполук на вході були суттєво нижчими, ніж допустимі для риб значення.

У ході досліджень виявлено незначний вплив коливання температури в межах тепловодного рибницького комплексу на швидкості метаболізму ряскових. При культивуванні останніх за температури води в межах  $24 \dots 28^\circ\text{C}$  темпи росту досягали максимальних значень (подвоєння власної сирової біомаси за 4 доби). Доцільність визначення залежності темпів росту рослин від вмісту у воді розчинених кисню та вуглекислоти сумнівна, адже процеси фотосинтезу та дихання забезпечуються також плаваючим на поверхні листям, адже верхня частина листової пластини безпосередньо контактує із повітрям. Отже, найбільш вагомими параметрами, що можуть впливати на ефективність роботи фітореактора в умовах УЗВ і які необхідно контролювати, є тривалість та інтенсивність освітлення споруди, тривалість контакту рослин із забрудненою водою.

Забезпечення близьких максимальних темпів росту рослин за умови підтримки інших параметрів в оптимальних діапазонах досягалось при інтенсивності освітлення в межах  $0,2 \dots 0,3 \text{ Вт на } 1 \text{ м}^2$  при використанні люмінесцентних ламп із спеціалізованим спектром для рослин. При

використанні світлодіодних ламп розрахункова потужність освітлення може становити 0,05...0,1 Вт/м<sup>2</sup> залежно від їх світловіддачі та спектру. Якщо фітореактор розташовують під прозорим дахом, штучне освітлення необхідно вмикати лише у періоди, коли з'являється дефіцит природного сонячного освітлення. При розташуванні споруди у приміщенні без належної інсоляції необхідно забезпечити 12...14 годинне штучне освітлення. Подовження тривалості освітлення до 16 годин і більше не призводило до прискорення темпів росту ряскових. Водночас, зниження тривалості світлового дня пропорційно уповільнює темпи росту рослин, що необхідно враховувати при експлуатації споруди. Так, у періоди із мінімальним органічним навантаженням на очисні споруди доцільним з точки зору енергозбереження виявляється пропорційне скорочення тривалості штучного освітлення. Окрім того, при дефіциті поживних речовин навіть у умовах інтенсивного освітлення рослини все одно уповільнюють темпи зростання.

**Висновки.** Експериментальним шляхом підтверджено, що при незмінних параметрах середовища процес асиміляції сполук Нітрогену та Фосфору відбувається рівномірно, в оптимальних умовах 1 кг сирової маси ряски малої за годину здатний вилучати із води близько 14 г розчиненого амонію, або 0,6 г NH<sub>4</sub><sup>+</sup>. Таким чином, можна очікувати, що за умови перебування води у фітореакторі в межах 30 хв., кожен кілограм рослин у фітореакторі зможе асимілювати 0,3 г амонійного Нітрогену. Очисну потужність фітореактору за розчиненими сполуками Нітрогену можна розраховувати, приймаючи щільність посадки ряскових в межах 4...10 кг/м<sup>2</sup>. Також по мірі росту та розмноження рослин їх надлишкову масу необхідно видаляти і відразу ж згодовувати риbam. Одним із перспективних шляхів інтенсифікації роботи фітореактору є розміщення у його придонній частині інертного субстрату для культивування ракоподібних, молюсків та інших гідробіонтів, яких доцільно залучити до процесів очищення циркуляційної води. У такому випадку ефективність використання наявних площ у господарстві суттєво підвищиться, а з води додатково вилучатимуться або укрупнюватимуться нерозчинені дрібнодисперсні домішки.

### Список літератури

1. *Denitrification* in recirculating systems: Theory and applications // Aquacultural Engineering, 2006. 34. P. 364–376.
2. *Biodegradable* polymers as solid substrate and biofilm carrier for denitrification in recirculated aquaculture systems / A. Boley, W.-R. Müller, G. Haider // Aquacultural Engineering, 2000. 22. P. 75–85.
3. *New developments* in recirculating aquaculture systems in Europe: A perspective on environmental sustainability / C.I.M. Martins et al. // Aquacultural Engineering, 2010. Volume 43. Issue 3. P. 83-93.
4. *Sustainable Treatment of Aquaculture Effluents—What Can We Learn from the Past for the* / Ariel E. Turcios, Jutta Papenbrock // Sustainability, 2014. Volume 6. P. 836-856;

5. *Использование* макрофитов для очистки воды УЗВ от соединений азота / Кононцев С.В., Саблий Л.А., Гроховская Ю.Р. // Вопросы рыбного хозяйства Беларуси: сб. науч. тр., 2015. Вып. 31. С. 85-91.

*Надійшло до редакції 18.11.2016*

УДК 628.35

Ю.Д. КОПАНИЦЯ, кандидат технічних наук  
Київський національний університет будівництва і архітектури

### **РОЗРАХУНОК ГІДРОСТАТИЧНОГО ТИСКУ НА НЕСИМЕТРИЧНУ ПЛОСКУ ПОВЕРХНЮ. УНІВЕРСАЛЬНИЙ АЛГОРИТМ ТРЬОХ КОМАНД – К123**

*Приведено приклад організації розрахунку в комп'ютерних програмах сили тиску для задач гідростатики.*

**Ключові слова:** сила тиску, центр ваги.

*Приведен пример организации расчёта в компьютерных программах силы давления для задач гидростатики.*

**Ключевые слова:** сила давления, центр тяжести.

*The example of organisation of counting a pressure force for hydraulic task with computer programs is produced.*

**Key words:** pressure force, center of pressure.

Представлено розрахунок сили гідростатичного тиску на плоску несиметричну поверхню довільної форми на прикладі трикутної поверхні. Кожна грань плоскої поверхні утворено відповідно прямою, параболою й колом, які задані аналітично рівняннями в Декартові системи координат. Величина сили й координати центра тиску визначено за авторським алгоритмом метода трьох команд К123 – для плоскої поверхні - відносно двох ортогональних напрямків [1-4].

Проблема використання загальноприйнятих алгоритмів розрахунку сили гідростатичного тиску на плоскі поверхні полягає в суттєвому обмеженні умовних учбових прикладів, які представлено симетричними відносно вертикальної осі трикутними й прямокутними поверхнями, колом та півколом. Стандартні алгоритми, які широко представлено в підручниках, дозволяють визначати тільки одну – вертикальну координату та відповідну глибину занурення центру тиску відносно вільної поверхні рідини.

Будь-яка несиметрична плоска поверхня, наприклад трикутної форми, вимагає визначати координати центру дії вектора сили гідростатичного тиску за двома ортогональними напрямками, що не представлено в літературі