

ЕКОЛОГІЧНА ФІЗІОЛОГІЯ І БІОХІМІЯ ВОДНИХ ТВАРИН

УДК (581. 5263:556.531.4):574

Ю.Г. КРОТ, к. б. н., ст. наук. співроб., в.о. зав. відділу,
Інститут гідробіології НАН України,
просп. Героїв Сталінграда, 12, Київ, 04210, Україна
e-mail: yuriikrot@ukr.net
ORCID 0000-0001-8732-1322

І.М. КОНОВЕЦЬ, к. б. н., ст. наук. співроб., зав. лаб.,
Інститут гідробіології НАН України,
просп. Героїв Сталінграда, 12, Київ, 04210, Україна
e-mail: i.m.konovets@gmail.com
ORCID 0000-0003-4234-5026

М.Т. ГОНЧАРОВА, к. б. н., ст. наук. співроб.,
Інститут гідробіології НАН України,
просп. Героїв Сталінграда, 12, Київ, 04210, Україна,
e-mail: mariyagonch83@gmail.com
ORCID 0000-0003-3891-4572

Л.С. КІПНІС, к. б. н., ст. наук. співроб., ст. наук. співроб.,
Інститут гідробіології НАН України,
просп. Героїв Сталінграда, 12, Київ, 04210, Україна
e-mail: ecos_inhydro@ukr.net
ORCID 0000-0002-4008-5120

ЕФЕКТИВНІСТЬ РОБОТИ ДВОСТУПЕНЕВОГО ГІДРОФІТНОГО МОДУЛЯ У ВІДНОВЛЕННІ ЯКОСТІ ПОВЕРХНЕВИХ І СТІЧНИХ ВОД

*Продемонстровано ефективність функціонування експериментального двоступеневого гідрофітного модуля для доочистки і кондиціювання стічних вод. Модуль являє собою біоплато плаваючого типу, основу якого складає повітряно-водна рослина *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud зі штучно розвиненими придатковими коренями, яка разом з ризосферною та епіфітною мікрофлорою, найпростішими, коловертками і супутніми організмами виконує роль природного біофільтру. Результати експериментальних досліджень показали високу ефективність двоступеневого гідрофітного модуля при очищенні змодельованого середовища, яке містило органічне забруднення. Зниження хімічного споживання кисню (ХСК) на виході з модуля 1-го ступеня очищення води становило 62—75 %, 2-го — 63—77 %, значення БСК₅ знижувалось відповідно на 69—96 % і 76—97 %. Під час роботи системи спостерігається прискорення мінералізації органічних речовин, відбувається адсорбція завислих речовин, вміст яких знижується на 94—97 %, каламутність води зменшувалась на 85—98 %.*

Ц и т у в а н н я: Крот Ю.Г., Коновець І.М., Гончарова М.Т., Кіпніс Л.С. Ефективність роботи двоступеневого гідрофітного модуля у відновленні якості поверхневих та стічних вод. *Гідробіол. журн.* 2021. Т. 57, № 6. С. 57—59.

Ключові слова: гідрофітний модуль, *Phragmites australis*, доочищення забруднених вод, якість води.

Завдяки своїй здатності до накопичення, утилізації та трансформації багатьох забруднюючих речовин вищі водні рослини відіграють значну роль у процесах самоочищення водойм [13]. Вони є однією з ключових біотичних ланок у формуванні якості води [6] — у процесі своєї життєдіяльності рослини збагачують воду киснем, сприяють осіданню завислих речовин, поглинають біогенні елементи [7] та органічні речовини [8], вони здатні до накопичення і детоксикації деяких металів та токсичних речовин у концентраціях, що перевищують фонові значення [14]. Повітряно-водні рослини прибережних ділянок є першим бар'єром для забрудненого стоку з водозбірної території. У їхніх заростях осідає значна кількість мінеральних та органічних завислих речовин. Ці властивості дозволили успішно використовувати деякі з найбільш придатних видів водних рослин для доочищення виробничих і господарсько-побутових стічних вод [3—5, 12, 15, 16]. Природні і штучні «біоплато» з використанням водних рослин використовують як водоохоронні споруди для очистки води від забруднюючих речовин [9]. При їх функціонуванні у природних водоймах і водотоках утворюються специфічні зони, де зосереджуються різноманітні види рослин і тварин і більш активно відбуваються процеси відновлення якості водного середовища. Фітоценози, бактеріальні угруповання, водні тварини виконують в них роль середовищеутворюючого чинника і сприяють процесам утилізації, трансформації і транспорту біогенних елементів і забруднюючих речовин [2].

Одним з найбільш перспективних видів вищих водних рослин, які здатні ефективно очищувати різнотипне забруднення завдяки високій пластичності і формуванню потужної розгалуженої кореневої системи з ризосферною мікрофлорою [10], є очерет звичайний *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud [11].

Метою нашого дослідження було з'ясувати ефективність роботи двоступеневого гідрофітного модуля з *Ph. australis* з штучно розвиненою системою додаткових коренів та організмами-деструкторами, розміщеного у плаваючому стані, для відновлення якості води, забрудненої органічними речовинами.

Матеріал і методика досліджень

Для проведення експериментальних досліджень по доочищенню і кондиціюванню стічних вод нами було створено систему з двоступеневим гідрофітним модулем (ДГМ) з біоценозом, до складу якого входив *Ph. australis*, мікроорганізми-деструктори, найпростіші, коловертки та інші гідробіонти. Повітряно-водна рослина *Ph. australis* мала потужну мичкувату кореневу систему з штучно розвиненими додатковими коренями (рис. 1), завдяки великій площі поверхні якої створювалися сприятливі умови для розвитку ризосферної мікрофлори та інших гідробіонтів. Об'єм ДГМ складав 200 дм³, сітчастого контейнера з рослинами — 64 дм³.



Рис. 1. *Phragmites australis* із мичкуватою кореневою системою з штучно розвиненими придатковими коренями

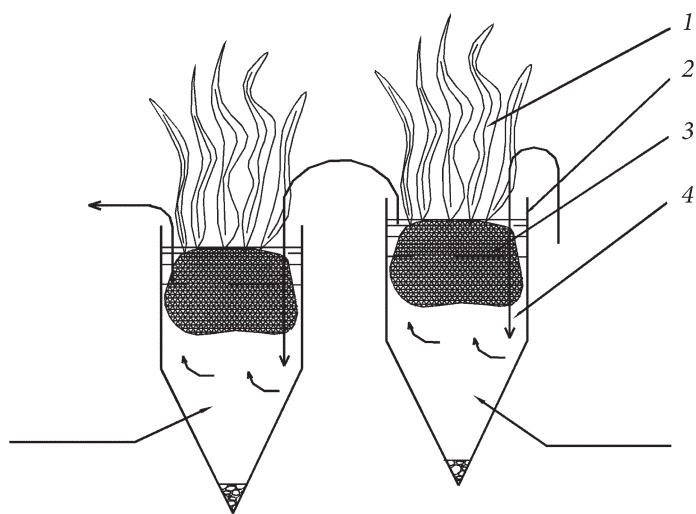
Експериментальна модель являла собою двоступеневе гідрофітне «біоплато», у якому вищі водні рослини розташовувались у контейнерах і перебували в плаваючому стані (рис. 2). Ефективність роботи ДГМ досліджували у двох режимах — без аерації та з примусовою аерацією обох модулів стислим повітрям.

Забруднена вода з розподільчої ємності надходила спочатку на перший, а потім на другий ступінь ДГМ. Проходячи крізь мичкувату кореневу систему рослин та очищуючись, вона потрапляла у ємність-накопичувач. За умов оборотного водопостачання цикл повторювався.

Для оцінки ефективності роботи ДГМ проводили аналіз якості модельного середовища на вході і виході з системи стандартними гідрохімічними методами [1] у трьох повторних вимірюваннях значень.

Для ефективного проходження процесів мінералізації і нітрифікації у ДГМ до початку експерименту, водні організми були аклімовані до підвищеного рівня забруднюючих речовин впродовж 10 діб. Для цього за умов оборотного водопостачання (швидкість потоку $3,6 \text{ дм}^3/\text{год}$) на 1-шу, 5-ту та 7-му добу у ДГМ вносили модельне середовище, у якому концентрація N-NH_4^+ становила $1,00 \text{ мг/дм}^3$, N-NO_2^- — $0,01 \text{ мг/дм}^3$, N-NO_3^- — $38,20 \text{ мг/дм}^3$, P-PO_4^{3-} — $11,00 \text{ мг/дм}^3$, ХСК — $81,40 \text{ мг О/дм}^3$, рН — $8,00$. Ефективність очистки на 10-ту добу експерименту за показниками каламутності, фосфору фосфатів та ХСК становила відповідно 52, 48 і 68 %, що свідчить про рівень адаптації водних організмів до заданого навантаження, а також перебіг у ДГМ процесів мінералізації органічної речовини.

Вивчення очисної здатності ДГМ в умовах проточного режиму проводили при швидкостях потоку води $5,1$ і $3,7 \text{ дм}^3/\text{год}$, час повної заміни



А



Б

Рис. 2. Експериментальний двоступеневий гідрофітний модуль. А — принципова схема: 1 — повітряно-водні рослини, 2 — конусна ємність, 3 — додаткові корені, 4 — напрямок протікання стічної води; Б — загальний вигляд установки

середовища у системі дорівнював відповідно 26,7 та 36,8 год, відбір проб для гідрохімічних досліджень проводився відповідно через 24 та 48 годин.

Вихідне модельне середовище, що використовувалося для досліджень характеризувалось каламутністю у межах 0,74—0,87 од. за ФЕК, ХСК — 71—75 мг О/дм³, БСК₅ — 7,7—9,7 мг О₂/дм³, вмістом N-NH₄⁺,

1,6—3,0 мг/дм³, при цьому вміст N-NO₂⁻, N-NO₃⁻ і P-PO₄³⁻ був незначним. За перебігом біохімічних процесів воно знаходилося на стадії неповного окислення органічної речовини — початковій нітрифікації.

Статистичну обробку результатів досліджень виконували загальноприйнятими методами варіаційної статистики, у таблицях результати представлені як середні і їх стандартні відхилення. Порівняння статистичної значущості різниці середніх проводили за критерієм Стьюдента.

Результати досліджень та їх обговорення

Враховуючи те, що у процесі очистки ДГМ забруднених органічною речовиною вод сполуки NH₄⁺ і NO₂⁻ є нестійкими, їхня концентрація визначається інтенсивністю перебігу процесів амоніфікації і нітрифікації, вмістом розчиненого у воді кисню, вони можуть розглядатися як індикатори співвідношення біохімічних процесів очищення стічних вод. Тому при моделюванні забруднюючого середовища, пріоритетними вважались такі показники, як рівень ХСК, БСК₅ і каламутність.

Встановлено, що при швидкості потоку 5,1 дм³/год через добу роботи ДГМ ефект очищення становив за ХСК становив 63 %, за БСК₅ — 76 %, за вмістом завислих речовин — 88 %, каламутністю — 78 % (табл. 1).

Відмічено прискорення процесів мінералізації органічної речовини в очисному модулі. Очищена вода характеризувалась зниженням рівня рН і вмісту N-NH₄⁺, збільшенням концентрації N-NO₂⁻, що вказує на активний перебіг процесу мінералізації органічної речовини у ДГМ. Важливо відмітити суттєве зниження вмісту N-NO₃⁻ і P-PO₄³⁻ в очищеній воді порівняно з початковим рівнем.

Оскільки у дослідженнях *Ph. australis* знаходився на початковій стадії вегетації, на нашу думку зменшення вмісту сполук азоту і фосфору у воді відбувалося переважно за рахунок споживання біогенних елементів мікроорганізмами-деструкторами, які активно розвиваються на занурених органах, насамперед коренях рослин. У процесі функціонування ДГМ вміст розчиненого у воді кисню знизився до 4,76 мг/дм³, що могло негативно вплинути на процеси амоніфікації, але не нітрифікації.

Оцінка ефективності очисної здатності кожного ступеня ДГМ при швидкості потоку 3,7 дм³/год показала (табл. 2), що її зменшення і, відповідно, збільшення часу перебування забрудненої води у ДГМ призвело до суттєвого зниження вмісту розчиненого кисню (до 2,11 мг/дм³) і більш значного зниження рН впродовж першої доби порівняно з аналогічними показниками за більшої швидкості потоку.

При зменшенні концентрації розчиненого кисню до 3,0—2,5 мг/дм³ відмічено гальмування процесів нітрифікації. На другу добу інтенсивність окислення органічної речовини мікроорганізмами-деструкторами дещо знижувалась і процес нітрифікації відновлювався. При цьому відмічено покращення якості води на виході з другого ступеня ДГМ за показниками каламутності, ХСК і кількості завислих речовин порівняно з більшою швидкістю потоку води. Однак, підвищений вміст N-NH₄⁺ і N-NO₂⁻, менша концентрація N-NO₃⁻ і P-PO₄³⁻ у системі вказують на

більшу активність мікроорганізмів-деструкторів у гідрофітному модулі при уповільненні швидкості потоку.

Ефективність очищення забрудненої води при швидкості потоку 3,7 дм³/год за показниками ХСК, БСК₅ і каламутності вже на першу добу становила для 1-го ступеня відповідно 62, 69 і 85 %, 2-го — відповідно 75, 80 і 92, на 2-у добу — відповідно 63, 84, 99 % і 74, 83, 99 %. Порівняння ефекту очищення на першу добу після 2-го ступеня ДГМ при двох швидкостях потоку свідчить про статистично вірогідне покращення результатів при меншій швидкості потоку за показником ХСК на 19 % ($p=0,029$) і каламутності на 17 % ($p=0,026$).

Отже, до провідних чинників, що впливають на очисну здатність ДГМ можна віднести швидкість потоку, об'єм і площу кореневої системи рослин.

Для інтенсифікації перебігу біохімічних процесів у ДГМ необхідно забезпечити достатню кількість розчиненого кисню, нестача якого може пригнічувати як процеси нітрифікації, так і негативно впливати на жит-

Таблиця 1

Показники ефективності очищення модельного середовища у ДГМ при швидкості потоку 5,1 дм³/год через 24 год експерименту, $n=3$

Показники	Вхід у ДГМ		Вихід з 2-го ступеню	
	\bar{M}	σ	\bar{M}	σ
Температура, °С	19,8	0,2	20,0	0,3
pH	8,13	0,08	7,86	0,05
Розчинений кисень, мг/дм ³	6,88	0,07	4,76	0,12
Азот амонійний, мг/дм ³	2,88	0,05	2,15	0,04
Азот нітритний, мг/дм ³	0,02	0,01	0,03	0,02
Азот нітратний, мг/дм ³	0,10	0,05	2,99	0,21
Фосфор фосфатів, мг/дм ³	0,37	0,03	4,42	0,05
Каламутність, дані по ФЕК	0,65	0,05	0,14	0,02
Залізо загальне, мг/дм ³	1,11	0,05	0,13	0,02
Жорсткість, ммоль/дм ³	4,4	0,3	—	
Лужність, ммоль/дм ³	5,1	0,4	—	
Сухий залишок, мг/дм ³	462	32	496	38
БСК ₅ , мг О ₂ /дм ³	6,7	0,2	1,6	0,1
ХСК, мг О/дм ³	75,0	2,5	27,9	2,2
Завислі речовини, мг/дм ³	61,2	5,3	7,4	1,1

П р и м і т к а. Тут і в табл. 2—4: \bar{M} — середнє значення; σ — стандартне відхилення; «—» — не визначали.

Таблиця 2
Показники ефективності очищення модельного середовища у ДГМ при швидкості прогоку 3,7 дм³/год через 24 та 48 год експерименту, n=3

Показники	Вхід у		Вихід									
	ДГМ		1-а доба			2-а доба						
	\bar{M}	σ	1 ступінь		2 ступінь		1 ступінь		2 ступінь			
			\bar{M}	σ	\bar{M}	σ	\bar{M}	σ	\bar{M}	σ		
Температура, °С	20,8	0,2	21,0	0,1	21,0	0,1	21,0	0,1	21,0	0,1	21,0	0,1
pH	8,02	0,07	7,91	0,06	7,76	0,06	7,98	0,05	7,88	0,05	7,88	0,05
Розчинений кисень, мг/дм ³	6,47	0,05	2,11	0,06	3,64	0,05	2,49	0,04	1,78	0,06	1,78	0,06
Азот амонійний, мг/дм ³	2,92	0,05	2,64	0,04	2,21	0,03	1,56	0,05	1,37	0,03	1,37	0,03
Азот нітритний, мг/дм ³	0,02	0,01	0,02	0,01	0,03	0,01	0,02	0,00	0,03	0,01	0,03	0,01
Азот нітратний, мг/дм ³	0,61	0,04	0,83	0,05	1,49	0,02	0,47	0,03	0,69	0,05	0,69	0,05
Фосфор фосфатів, мг/дм ³	0,89	0,07	2,80	0,05	3,02	0,03	2,09	0,02	2,95	0,03	2,95	0,03
Каламутність, дані по ФЕК	0,87	0,02	0,13	0,02	0,07	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00
Залізо загальне, мг/дм ³	1,47	0,03	0,02	0,01	0,03	0,01	0,02	0,00	0,02	0,00	0,02	0,00
БСК ₅ , мг O ₂ /дм ³	8,1	0,2	2,5	0,2	1,6	0,2	1,3	0,1	1,4	0,1	1,4	0,1
ХСК, мг O/дм ³	71,0	1,9	26,7	0,7	17,8	0,6	26,6	0,6	18,6	0,4	18,6	0,4
Завислі речовини, мг/дм ³	118,2	4,5	5,0	0,1	5,0	0,2	7,4	0,2	13,8	0,2	13,8	0,2

тедіяльність водних організмів, що сприяють фільтрації і деструкції органічних забруднень.

У зв'язку з цим, було проведено дослідження очисної здатності ДГМ з використанням аераційної системи, розташованої нижче кореневої зони рослин. Результати досліджень наведені у таблиці 3. Завдяки аерації водного середовища, у процесі експерименту спостерігали істотне підвищення ефективності роботи ДГМ, концентрація розчиненого кисню в обох ступенях ДГМ становила 6,98—7,76 мг/дм³.

Встановлено, що за умов додаткової аерації при швидкості потоку 5,1 дм³/год значення ХСК, БСК₅, N-NH₄⁺, N-NO₂⁻, N-NO₃⁻ вже на виході з 1-го ступеня ДГМ відповідали нормативам якості, за каламутністю — після 2-го ступеня.

На виході з 1-го ступеня ДГМ значення ХСК знижувався на 70 %, БСК₅ — 82 %, каламутність — 91 %, на 2-му ступені ці показники знизились відповідно ще на 6 ($p=0,005$), 10 ($p=0,011$) і 4 %.

Зменшення швидкості потоку забрудненої води до 3,7 дм³/год в ДГМ з додатковою аерацією характеризувалось зростанням рН і вмісту розчиненого кисню, зниженням значень ХСК на виході з 1-го ступеня на 75 %, БСК₅ — на 96 %, каламутності — на 98 %, вмісту завислих речовин — на 87 %, з 2-го ступеня — відповідно на 77, 97, 98, 93 % (табл. 4).

Таблиця 3

Показники ефективності очищення модельного середовища у ДГМ з аерацією при швидкості потоку 5,1 м³/год через 24 год експерименту, $n=3$

Показники	Вхід		Вихід			
	у ДГМ		1-й ступінь		2-й ступінь	
	\bar{M}	σ	\bar{M}	σ	\bar{M}	σ
Температура, °С	21,0	0,1	21,0	0,1	21,0	0,1
рН	7,96	0,05	8,10	0,08	8,26	0,09
Розчинений кисень, мг/дм ³	4,35	0,08	6,98	0,10	7,76	0,08
Азот амонійний, мг/дм ³	5,06	0,3	1,89	0,06	1,41	0,05
Азот нітритний, мг/дм ³	0,07	0,02	0,02	0,01	0,01	0,00
Азот нітратний, мг/дм ³	≤0,10		0,68	0,06	0,58	0,04
Фосфор фосфатів, мг/дм ³	1,10	0,05	2,23	0,08	2,14	0,09
Каламутність, дані по ФЕК	0,65	0,04	0,06	0,02	0,03	0,01
Залізо загальне, мг/дм ³	1,35	0,12	0,02	0,01	0,02	0,00
Сухий залишок, мг/дм ³	430	34	394	20	448	35
БСК ₅ , мг О ₂ /дм ³	13,1	1,2	2,3	0,1	1,0	0,1
ХСК, мг О/дм ³	73,1	0,6	21,9	0,4	17,8	0,4
Завислі речовини, мг/дм ³	92,0	2,0	7,0	0,6	4,0	0,2

Таблиця 4
Показники ефективності очищення модельного середовища у ДГМ при швидкості протоку 3,7 дм³/год з аерацією через 24 та 48 год експерименту, n=3

Показники	Вхід у		Вихід											
	ДГМ		1-а доба				2-а доба							
	\bar{M}	σ	1-й ступінь		2-й ступінь		1-й ступінь		2-й ступінь					
			\bar{M}	σ	\bar{M}	σ	\bar{M}	σ	\bar{M}	σ				
Температура, °C	21,0	0,1	21,2	0,1	21,2	0,1	21,2	0,1	21,2	0,1	21,2	0,1	21,2	0,1
pH	7,92	0,08	8,42	0,05	8,46	0,07	8,45	0,08	8,45	0,08	8,50	0,06	8,50	0,06
Розчинений кисень, мг/дм ³	3,49	0,08	7,40	0,04	7,55	0,06	7,55	0,05	7,55	0,05	7,62	0,04	7,62	0,04
Азот амонійний, мг/дм ³	4,84	0,20	1,25	0,05	1,15	0,06	1,09	0,02	1,09	0,02	1,09	0,02	1,09	0,02
Азот нітритний, мг/дм ³	0,09	0,02	0,02	0,01	<0,01		0,02	0,00	0,02	0,00	<0,01		<0,01	
Азот нітратний, мг/дм ³	0,22	0,03	1,4	0,2	0,92	0,05	1,73	0,08	1,73	0,08	1,25	0,05	1,25	0,05
Фосфор фосфатів, мг/дм ³	2,23	0,12	2,18	0,15	2,02	0,18	1,97	0,14	1,97	0,14	1,94	0,13	1,94	0,13
Каломутність, дані по ФЕК	0,60	0,03	0,02	0,01	0,02	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00
Залізо загальне, мг/дм ³	1,30	0,12	0,02	0,00	0,02	0,00	0,02	0,00	0,02	0,00	0,02	0,00	0,02	0,00
БСК ₅ , мг O ₂ /дм ³	12,5	0,8	1,2	0,2	0,7	0,1	0,5	0,2	0,5	0,2	0,4	0,1	0,4	0,1
ХСК, мг O/дм ³	75,1	3,4	27,9	1,2	17,0	0,8	18,6	0,9	18,6	0,9	17,0	0,5	17,0	0,5
Завислі речовини, мг/дм ³	54,6	2,5	9,6	0,5	5,8	0,4	7,0	0,5	7,0	0,5	5,0	0,4	5,0	0,4

Отже, за цієї швидкості потоку води та використання аераційної системи, ефективність очищення забрудненої води значно підвищилася вже після проходження 1-го ступеня ДГМ.

Особливості динаміки вмісту неорганічних сполук азоту і фосфору фосфатів у ДГМ полягали у значному зменшенні концентрацій N-NH_4^+ і N-NO_2^- , збільшенні N-NO_3^- і P-PO_4^{3-} , що є результатом покращення кисневих умов і ефективного перебігу окислювальних процесів у системі. При цьому для 2-го ступеня ДГМ характерно зниження концентрацій неорганічних сполук азоту і фосфору фосфатів, що є наслідком як меншого навантаження на систему порівняно з 1-м ступенем, так і видаленням мінеральних сполук, особливо нітратної форми азоту.

Результати досліджень показали, що очисна здатність ДГМ при швидкості потоку води $3,7 \text{ дм}^3/\text{год}$ була подібною до такої за $5,1 \text{ дм}^3/\text{год}$ за умов додаткової аерації. Ефективність очищення води порівняно з системою без аерації зросла за показниками ХСК, БСК₅, каламутністю відповідно на 13 ($p=0,023$), 16 ($p=0,002$) і 17 % ($p=0,016$). Таким чином, інтенсифікація процесів очищення стічної води у ДГМ за допомогою введення аерації середовища може суттєво підвищити ефективність процесів біохімічного очищення і істотно зменшити площу гідрофітної очисної системи.

Висновки

Двоступеневий гідрофітний модуль показав високу ефективність очищення модельного середовища, забрудненого органічною речовиною, забезпечивши зниження рівня ХСК на виході з 1-го ступеня на 62—75 %, 2-го — 63—77 %, БСК₅ — відповідно на 69—96 і 76—97 %.

Штучно розвинена система додаткових коренів *Ph. australis* разом з ризосферними мікроорганізмами, особливо у період активної вегетації, істотно прискорює мінералізацію органічної речовини, забезпечує адсорбцію завислих речовин, знижуючи їхній вміст на 94—97 %, каламутність — на 85—98 %.

Завдяки підвищенню вмісту розчиненого у воді кисню, використання аераційних систем у ДГМ забезпечує більш сприятливі умови для перебігу окислювальних процесів у зоні коренів (особливо при надходженні води з неповним окисленням органічних речовин), розвитку ризосферних мікроорганізмів, прискорюючи перебіг біохімічних процесів мінералізації органічної речовини та сприяючи нітрифікації мінеральних сполук азоту.

Список використаної літератури

1. Методи гідроекологічних досліджень поверхневих вод (за ред. В.Д. Романенка). Київ : Логос. 2006. 408 с.
2. Романенко В.Д., Крот Ю.Г., Киризія Т.Я. та ін. Природні і штучні біоплато. Фундаментальні та практичні аспекти. Київ : Наук. думка. 2012. 112 с.
3. Akrotas C.S., Tsihrintzis V.A. Effect of temperature, HRT, vegetation and porous media on removal efficiency of pilot-scale horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Ecol Eng.* 2007. Vol. 29. P. 173—191. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2006.06.013>

4. Alsgayer R. Salmiaton, A. Mohammad, T. et al. Removal Efficiencies of Constructed Wetland Planted with *Phragmites* and *Vetiver* in Treating Synthetic Wastewater Contaminated with High Concentration of PAHs. *Sustainability*. 2020. Vol. 12. P. 33—57. <https://doi.org/10.3390/su12083357>
5. Angassa K., Leta S., Mulat W. et al. Organic matter and nutrient removal performance of horizontal subsurface flow constructed wetlands planted with *Phragmites karka* and *Vetiveria zizanioides* for treating municipal wastewater. *Environ. Process*. 2018. Vol. 5, N 1. P. 115—130.
6. Dhote S., Dixit S. Water quality improvement through macrophytes — a review. *Environ Monit Assess*. 2009. Vol. 152, N 1—4. P. 149—53.
7. Feng S., Zhian L., Yingwen L. et al. Removal of total nitrogen and phosphorus using single or combinations of aquatic plants. *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 2019. Vol. 16 (23). P. 46—63.
8. Kochi L.Y., Freitas P.L., Maranhão L.T. et al. Aquatic macrophytes in constructed wetlands: a fight against water pollution. *Sustainability*. 2020. Vol. 12, N 21. P. 9202.
9. Krot Yu.G. The use of higher aquatic plants in biotechnologies of surface water and wastewater treatment. *Hydrobiol. J*. 2006. Vol. 42, N 3. P. 44—55.
10. Li Y.H., Zhu J.N., Liu Q.F. et al. Comparison of the diversity of root-associated bacteria in *Phragmites australis* and *Typha angustifolia* L. in artificial wetlands. *World J. Microbiol. Biotechnol*. 2013. Vol. 29. P. 1499—1508.
11. Milke J., Gałczyńska M., Wróbel J. The importance of biological and ecological properties of *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud., in phytoremediation of aquatic ecosystems — the review. *Water; Basel*. 2020. Vol. 12, N 6. P. 1770.
12. Nizam, N.U., Hanafiah, M.M., Noor, I.M., Karim, H.I. Efficiency of five selected aquatic plants in phytoremediation of aquaculture wastewater. *Appl. Sci*. 2020. Vol. 10. P. 2712.
13. Ostroumov S. Aquatic ecosystem and improvement of water quality: water self-purification. *Sci. Int. (Lahore)*. 2018. Vol. 30, N 2. P. 303—308.
14. Rai P. K. Heavy metal pollution in aquatic ecosystems and its phytoremediation using wetland plants: an ecosustainable approach. *Int. J. Phytoremediation*. 2008. Vol. 10, N 2. P. 131—158.
15. Romanenko V.D., Krot Yu.G., Goncharova M.T. et al. Artificial hydrobiocenoses in rehabilitation of surface and waste water quality. *Hydrobiol. J*. 2021. Vol. 57, N 5. P. 60—69.
16. Zimmels Y., Kirzhner F., Roitman S. Use of naturally growing aquatic plants for wastewater purification. *Water Environ. Res*. 2004. Vol. 76, N 3. P. 220—230.

Надійшла 30.07.2021

Yu. Krot, PhD (Biol.), Senior Researcher, Head of Department,
Institute of Hydrobiology of the NAS of Ukraine,
12 Geroyiv Stalingrada prosp., Kyiv, 04210, Ukraine
e-mail: yuriikrot@ukr.net
ORCID 0000-0001-8732-1322

I. Konovets, PhD (Biol.), Senior Researcher, Head of Lab.,
Institute of Hydrobiology of the NAS of Ukraine,
12 Geroyiv Stalingrada prosp., Kyiv, 04210, Ukraine
e-mail: i.m.konovets@gmail.com
ORCID 0000-0003-4234-5026

M. Goncharova, PhD (Biol.), Senior Researcher,
Institute of Hydrobiology of the NAS of Ukraine,
12 Geroyiv Stalingrada prosp., Kyiv, 04210, Ukraine
e-mail: mariyagonch83@gmail.com
ORCID 0000-0003-3891-4572

L. Kipnis, PhD (Biol.), Senior Researcher,
Institute of Hydrobiology of the NAS of Ukraine,
12 Geroyiv Stalingrada prosp., Kyiv, 04210, Ukraine
e-mail: ecos_inhydro@ukr.net
ORCID 0000-0002-4008-5120

THE EFFICIENCY OF THE TWO-STAGE HYDROPHYTIC MODULE IN RESTORING THE QUALITY OF SURFACE AND WASTE WATER

The efficiency of the experimental two-stage hydrophyte module for wastewater treatment and conditioning is demonstrated. The module represents a floating bioplateau based on the air-water plant *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud possessing artificially developed adventitious roots acting as a natural biofilter in cooperation with the rhizosphere and epiphytic microflora, protozoa, rotifers, and related organisms. The results of experimental studies showed the high efficiency of the two-stage hydrophytic module in the purification of the simulated medium with high organic contamination. The decrease in the level of chemical oxygen demand (COD) at the outlet of the module of the 1st stage of water purification was 62–75 %, at the outlet of the second — 63–77 %, biological oxygen demand (BOD₅) — by 69–96 % and 76–97 %, respectively. During the operation of the system, there is an increase in organic substances mineralization rate, reducing of suspended solids contents by 94–97 %, reducing the turbidity of water by 85–98 %.

Keywords: hydrophyte module, *Phragmites australis*, waste water post-treatment, water quality.