

МЕТОДИ І МЕТОДИКИ

УДК 502.51:504(477.72)

DOI <https://doi.org/10.32851/wba.2022.1.10>

ВИКОРИСТАННЯ *EICHHORNIA CRASSIPES* ТА *LEMNA MINOR* ДЛЯ ДОДАТКОВОГО ОЧИЩЕННЯ КОМУНАЛЬНИХ СТОКІВ

Пічура В.І. – д. с.-г. н., професор,

Потравка Л.О. – д. е. н., професор,

Херсонський державний аграрно-економічний університет

pichuravitalii@gmail.com, potravkalarisa@gmail.com

На сучасному етапі водовідведення та очищення комунальних і багатьох типів каналізаційно-скидних вод на території України переважно використовують традиційні технології біологічного очищення в аеротенках процесом аеробного окиснення за участю активного мулу, які характеризуються низькою ефективністю. Скиди неочищених та умовно очищених вод призводять до виникнення анаеробних процесів, гниття, органічних забруднень, що обумовлює непридатність водойм та водотоків приймачів каналізаційно-скидних вод для водокористування, призводить до замору риби, цвітіння та їх заростання. Визначено, що ефективними є біологічні технології очистки та доочистки каналізаційно-скидних вод, які передбачають застосування гідрофітів. В умовах зростання рівня антропогенного навантаження на водні ресурси, еколого-біологічне та господарське обґрунтування застосування вищих водних рослин для забезпечення біологічної очистки каналізаційно-скидних вод є актуальним. Об'єктом дослідження визначено процес покращення якості каналізаційно-скидних вод міста Херсон із застосуванням вищих водних рослин. Дослідження стану якості каналізаційно-скидних вод та ефективності їх очистки проводилися у три етапи: I етап – «стан до очистки», II етап – «стан після механічно-біологічної очистки» існуючими міськими очисними спорудами, III етап – «стан після додаткового очищення гідрофітами». З метою визначення ефективності використання гідрофітів для додатково очищення у один ставок-відстійник було висаджено *Eichhornia crassipes* (водний гіацинт) і багаторічна водна рослина *Lemna minor*. В результаті проведеного експерименту визначено високу ефективність використання гідрофітів для додаткової очистки каналізаційно-стічних вод. Зокрема, ефективність доочистки у ставках-відстійниках залишку завислих речовин за 40 днів склала 32%, від токсичних солей в межах 13,0–23,0%, нафтопродуктів – 30,0%, біогенних речовин – 68,5–83,3%. Це призвело до зменшення значення хімічного та біологічного споживання кисню за 5 діб на 89,6% та 61,2% відповідно. Ефективність очистки стічних вод від токсичних солей та нафтопродуктів сягало до 97,7%, від мінеральних та органічних поллютантів до 99%, це значно підвищило якість скидних вод за рибогосподарськими критеріями. Зокрема, враховуючи високу поживну цінність *Eichhornia crassipes* та *Lemna mi-*

nor, було одержано 12,5 тонн сирової маси гідрофітів, яку можна використовувати у якості сидератів, кормів для сільськогосподарських тварин, птиці та риби.

Ключові слова: якість води, каналізаційні скиди, очисні системи, *Eichhornia crassipes*, *Lemna minor*, політанти, очистка води.

Постановка проблеми. Посилення забруднення поверхневих вод та деградація природного стану водних об'єктів призвело до значного скорочення гідромережі, дефіциту водних ресурсів та їх непридатності без додаткової очистки для комунальних, рибогосподарських потреб та зрошення. Основними причинами погіршення поверхневих вод є зарегулювання водотоків та зменшення стоку [1], скидання неочищених та недостатньо очищених стоків [2], масова вирубка лісів [3, 4], знищення водоохоронних зон, скорочення природних угідь, порушення агротехніки на водозборах (розорювання схилів та заплав) [5] призвело до посилення проявів ерозійних процесів [6, 7], абразії берегів, замулення, зарегулювання та деградації водотоків. На ряду із постійним підвищення антропогенного навантаження зростає частота негативних проявів кліматичних змін на стан водних ресурсів та водозбірних басейнів [8, 9], що призводить до трансформації структурно-функціонального природного стану ландшафтних і аквально-структур.

Скиди неочищених та умовно очищених вод призводять до виникнення анаеробних процесів, гниття, органічних забруднень, що обумовлює непридатність водойм та водотоків приймачів каналізаційно-скидних вод для водокористування, призводить до замору риби, цвітіння та їх заростання. Скидні води комунальної та промислової галузі є небезпечними, характеризуються високою концентрацією завислих речовин, синтетичних поверхнево-активних речовин (СПАР), високомолекулярних органічних сполук, іонів важких металів, радіонуклідів, нафтопродуктів та інших політанти, що унеможлиблює їх використання для задоволення рибогосподарських потреб та зрошення [10–12] тощо.

На сучасному етапі водовідведення та очищення комунальних і багатьох типів каналізаційно-скидних вод на території України використовують традиційні технології біологічного очищення в аеротенках процесом аеробного окиснення за участю активного мулу. Ці технології використовуються з 50–60-х років минулого століття, насамперед, для очищення висококонцентрованих скидних вод. Вони мають низьку ефективність та ряд недоліків, а саме: погіршення ефективності очищення при нерівномірному надходженні скидних вод і концентраціями забруднень, уповільнення процесу очищення в результаті низької та швидкої зміни температури, рН, токсичних для активного мулу речовин, невідповідність якості очищеної води встановленим нормам водокористування, високий рівень надлишкового мулу, який потребує

додаткових витрат на утилізацію [13]. Зокрема, існуючі біологічні очисні споруди не відповідають сучасним вимогам до природоохоронних заходів, не забезпечують належної водоочистки та дотримання гранично допустимих скидів забруднювальних речовин у природні води. Тому, актуальності набуває розробка, апробація та практичне застосування ефективних та низьковитратних технологій очистки скидних вод.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дієвим та ефективним рішенням є застосування біологічних технологій очистки та доочистки каналізаційно-скидних вод із застосуванням гідрофітів [14–16]. Вони покращують хімічні властивості води і являються біологічним фільтром очистки водних ресурсів [17–19]. В умовах зростання рівня антропогенного навантаження на водні ресурси, еколого-біологічне та господарське обґрунтування застосування вищих водних рослин для забезпечення біологічної очистки каналізаційно-скидних вод є актуальним. Зокрема, дослідження практичного застосування гідрофітів представляє значний господарський інтерес для очистки та доочистки каналізаційно-скидних вод з метою їх повторного використання та зменшення навантаження на поверхневі води.

Постановка завдання. Визначити ефективність застосування *Eichhornia crassipes* (водний гіацинт) і багаторічна водна рослина *Lemna minor* для біологічної очистки та доочистки комунальних стоків.

Матеріали і методи досліджень. Об'єктом дослідження визначено процес покращення якості каналізаційно-скидних вод міста Херсон із застосуванням вищих водних рослин. Дослідження стану якості каналізаційно-скидних вод та ефективності їх очистки проводилися у три етапи: I етап – «стан до очистки», II етап – «стан після механічно-біологічної очистки» існуючими міськими очисними спорудами, III етап – «стан після додаткового очищення гідрофітами» (рис. 1).

Міські очисні споруди із загальною площею 85,2 га щодобово очищують 45-50 тис.м³ стоків, які через 17 насосних станцій потрапляють на очисні споруди. Загальна довжина мережі водовідведення становить 297 км. Очисні споруди міста побудовано у 1975 році, вони мають двоступеневу схему очищення стоків: механічна очистка – решітки, пісколовки і первинні відстійники, які утримують важкі забруднення і очищують каналізаційні води на 35–40%; біологічна очистка – очищення стічної води біоорганізмами, життєдіяльність яких підтримується подачею киснем (аеротенки), забезпечується очистка вод до 90% і більше. Далі, вода подається на вторинні відстійники, після яких скидається в правий рукав р. Дніпро – р. Кошову через р. Вірьовчину.

В останні 25 років реконструкцію очисних споруд не проводили, що призвело до зниження ефективності очистки каналізаційно-стічних вод

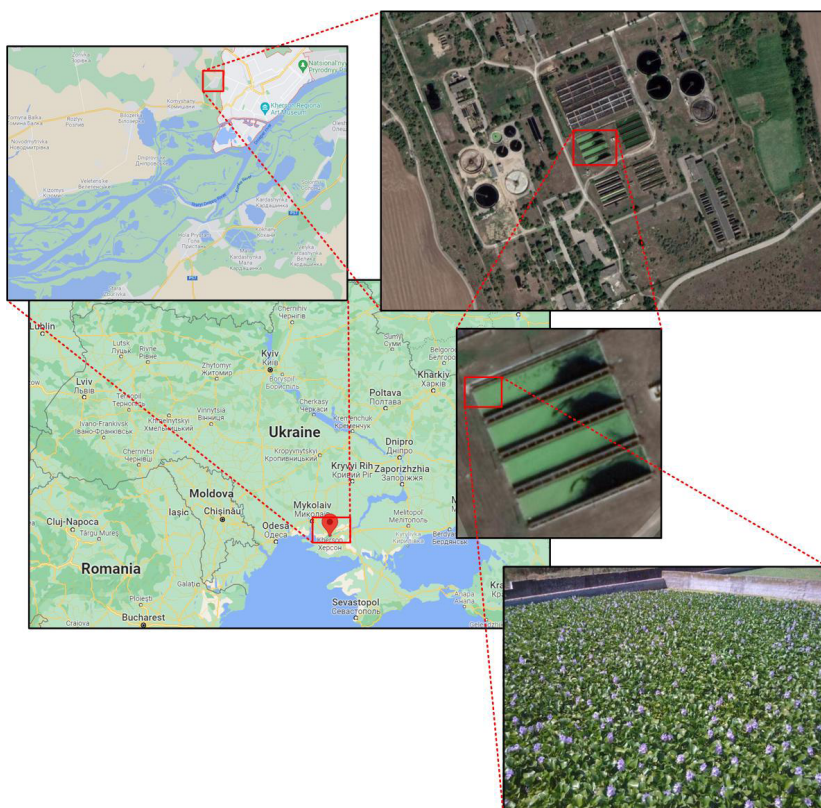


Рис. 1. Місце розташування очисних споруд міста Херсон та дослідних ставків-відстійників для гідролітичного доочищення води

міста Херсон. Тому для проведення третього етапу дослідження результатів доочищення води в один ставок-відстійник висаджено *Eichhornia crassipes* і багаторічну водну рослину *Lemna minor*. Загальна площа чотирьох ставків-відстійників складає 17,2 га із потужністю доочищення каналізаційних скидів до 250 тис. м³. Експеримент третього етапу досліджень був закладений в одному окремо підготовленому ставку-відстійнику площею 1,0 га із глибиною 1,5 метри із фактичним вмістом об'єму каналізаційних стоків 13 000 м³. Розміщення гідрофітів у ставку-відстійнику каналізаційних вод визначена із розрахунку 1 рослина *Eichhornia crassipes* на 5 м² із середньою вагою сирої маси 62,0±10,0 грами та додатковою посадкою *Lemna minor* близько 10% ваги *Eichhornia crassipes*. Загальна маса розміщення гідрофітів на 1,0 га ставка склала близько 136,5 кг. Дослідження проводилося в літній період, тому що у липні-серпні рівень водного споживання та скидів сягає максимуму. Температура води у вторинних відстійниках складала у червні – 26,0–27,5 °С, липні 27,0–34,0 °С, серпні – 28,2–34,5 °С.

Стан якості води на трьох етапах визначався в період 2016–2021 рр. за показниками зміни її гідрохімічних властивостей. Ефективність очищення каналізаційних стоків на очисних спорудах визначалася порівнянням їх якості до подачі і після скиду з очисних споруд у відповідності до методики контролю якості стічних вод [20]. Комплексну оцінку якості каналізаційно-скидних вод здійснено за різними методиками, діючими в Україні нормативами якості води поверхневих водних об'єктів за значенням гранично допустимої концентрації (*ГДК*) для рибогосподарського призначення [21, 22]. Для обробки та аналізу вхідних даних використані ліцензійні програмні продукти STATISTICA Advanced + QC for Windows v.10 Ru.

Результати дослідження та їх обговорення. Водовідведення побутових та промислових стоків здійснюється самотічно каналізаційною системою міста Херсон, потужність її складає до 250 тис.м³ на добу. Близько 60% каналізаційної системи міста знаходиться в незадовільному технічному стані, це призводить до систематичного їх прориву, витоку та перерозподілу каналізаційних стоків в ґрунтових водах, які гідравлічно пов'язані із неогеновими горизонтами водопостачання міста. Для підтримки задовільного стану мережі необхідно щорічно оновлювати не менше 5% (45 км/рік) її довжини, за фактичними даними в період 2016–2021 рр. щорічно відновлювалося близько 0,8% каналізаційної мережі. Окрім цього, у період 2016–2021 рр. щоденні обсяги каналізаційного водовідведення на очисні споруди міста (смт Комишани) складають 45–50 тис. м³, які через біологічні ставки умовно очищеними скидаються в правий рукав Дніпра.

Визначено негативний вплив цих скидів на погіршення стану гідроекосистем Нижнього Дніпра, що підсилюється погіршенням технічних умов очисних споруд, зокрема, невчасна очистка біологічних ставків приводить до скиду значної кількості забрудненого мулу, що викликає потрапляння в річку близько 400 тонн поверхнево-активних речовин, окисів азоту, сірки, фосфору, нафтопродуктів тощо.

Встановлено, що у період 2016–2021 рр. середнє значення окремих показників гідрохімічних властивостей каналізаційних скидів (табл. 1), які надходять безпосередньо до акваторії р. Вирьовчиної і перерозподіляються до річок Кошова та Дніпро за критеріями рибогосподарського призначення перевищувало *ГДК*: вмісту завислих речовин в 4,2 рази, фосфатів – 3,6 рази; сухого залишку – 1,3 рази; сульфатів – 1,7 рази; хлоридів – 1,2 рази; натрію+калію – 2,6 рази; азоту амонійного – 3,8 рази; нафтопродуктів – 2,0 рази.

Значною характерною ознакою зміни якості каналізаційних стоків є хімічне споживання кисню (*ХСК₅*) та біологічне споживання кисню за 5 діб (*БСК₅*) споживання кисню: значення *ХСК₅* (*ГДК*=2,0 мгО₂/дм³) до очистки 400,0±52,3 мгО₂/дм³, після очистки 54,2±9,8 мгО₂/дм³, ефективність очистки 86,45%; значення *БСК₅* (*ГДК*=2,0 мгО₂/дм³) до очистки

Таблиця 1. Гідрохімічні характеристики каналізаційних стоків у місці скиду за період 2016–2021 рр.

Сезон та роки		Завислі речовини, мг/л ³	pH	Сухий залишок, мг/л ³	Сульфати мг/л ³	Хлориди мг/л ³	Фосфати мг/л ³	Кальцій мг/л ³	Магній мг/л ³	Натрій + Калій мг/л ³	Азот амонійний мг/л ³	Азот нітратний мг/л ³	Нафтопродукти, мг/л ³
ГДК за рибогосподарськими критеріями													
Значення ГДК		20	6,5–8,5	1000	100	300	3,5	180	50	120	0,50	40	0,05
До очистки	$\bar{x}$	2327	8,2	32568	5733	6236	51,7	151,2	32,3	1226,7	49,2	186,7	0,12
	σ	441,3	0,24	4501	529	350	6,8	70,5	14,8	271,8	10,8	41,3	0,04
Після очистки	$\bar{x}$	84,0	8,5	1300	168	365,7	12,6	150,3	4,4	313,9	1,9	25,7	0,10
	σ	12,5	0,3	207,0	20,8	43,6	1,8	47,9	1,4	69,6	0,8	12,3	0,04
+/-		-2243	0,35	-31268	-5565	-5870	-39,1	-0,87	-27,9	-912,8	-47,3	-161	-0,02
Перевищення ГДК		4,2	–	1,3	1,7	1,2	3,6	–	–	2,6	3,8	–	2,0

200,0±34,5 мгО₂/дм³, після очистки 14,50±2,17 мгО₂/дм³, ефективність очистки 92,75%.

Зміну гідрохімічних властивостей каналізаційних стоків обґрунтовано вираженою сезонною динамікою, яка характеризується зміною обсягу використання води у господарсько-побутовій діяльності населення. До очисних систем в осінній період винос сухого залишку (солі, ґрунтово-піщані компоненти та біогенно-детритні частки) в 1,4 рази менший ніж в літній період. Тому ефективність очистки каналізаційних стоків залежить від кількості забруднюючих речовин, які надходять до очисних споруд. Тому ефективність очисних систем м. Херсон за різницею показників гідрохімічних властивостей приходу і скиду каналізаційних вод складає 50,0–97,0% (табл. 2).

Таблиця 2. Ефективність очистки каналізаційних стічних вод на очисних спорудах, %

Сезон та роки	Завислі речовини, мг/дм ³	Температура С°	pH	Мінералізація (сухий залишок) мг/дм ³	Сульфати мг/дм ³	Хлориди мг/дм ³	Фосфати мг/дм ³	Азот амонійний мг/дм ³	Азот нітратний мг/дм ³	Нафтопродукти, мг/дм ³
Червень 2020	55	0	1,22	95	97	94	75	95	95	58
Липень 2020	69	0	0	97	97	94	78	95	92	8
Серпень 2020	65	0	0	97	97	95	75	96	92	0
Червень 2021	68	0	1,22	96	96	95	77	93	89	75
Липень 2021	67	0	0	95	96	94	78	92	82	50
Серпень 2021	57	0	0	95	96	93	77	95	83	92

Результати дослідження гідрохімічних властивостей стану очищених каналізаційних стоків у місці їх скиду свідчать про суттєве зменшення поллютантів, які потрапляють з каналізаційними водами на очисні системи. Однак, у місці скиду річкової акваторії гідрохімічні властивості каналізаційних вод за окремими показниками перевищують значення ГДК для потреб рибогосподарського призначення в 4 рази.

Для зменшення швидкості та обсягу винесення поллютантів каналізаційними стоками міста в літній період та запобігання погіршення екологічного стану гідроекосистем річок нами запропоновано розміщення *Eichhornia crassipes* багаторічної водної рослини *Lemna minor* у ставок-відстійник вторинної аерації для додаткового очищення каналізаційних стоків. *Eichhornia crassipes* разом із *Lemna minor* здатні споживати біогенні речовини (азот, фосфор) та накопичувати важкі метали (свинець, ртуть, мідь, кадмій, нікель, кобальт, олово, марганець, залізо, цинк, хром), радіонукліди (цезій, стронцій, церій, кобальт та ін.). В результаті біохімічних процесів у кореневій

системі ейхорнії відбувається окислювально-відновлювальні реакції, які обумовлюють переробку високомолекулярних сполук у низькомолекулярні і виокремлення необхідних хімічних елементів живлення. Гідрофіти добре пристосовується до умов довкілля та здатні інтенсивно трансформувати органічні та неорганічні сполуки з водних розчинів. Водночас, концентруючись у великих кількостях, можуть ефективно мінералізувати детрит та контролювати чисельність мікроорганізмів. Тому використання гідрофітів підвищить ефективність біологічної додаткової очистки каналізаційних стоків та забезпечить розширення виробництва кормових ресурсів.

Ефективність використання *Eichhornia crassipes* та *Lemna minor* для додаткового очищення каналізаційних стоків вивчали у літні періоди 2016–2021 років, температуру повітря становила від 35,0 °C у червні до 46,0 °C у липні та серпні, температура води у відкритих водоймах варіювала від 26,0 °C у червні до 34,0 °C у липні та серпні. Дослідження швидкості очистки каналізаційних вод у ставках-відстійниках досліджувалося впродовж 40 днів, із частотою водозабору для фіксації значень гідрохімічних показників якості води кожні 10 днів (табл. 3).

Встановлено, що вміст поллютантів впродовж всього періоду досліджень додаткової очистки мали тенденцію до зменшення. Зокрема, ефективність доочистки у ставках-відстійниках залишку завислих речовин за 40 днів склала 32% – від $84,0 \pm 12,5$ мг/дм³ (4,20 ГДК) до $57,1 \pm 8,5$ мг/дм³ (2,86 ГДК). Значення рН варіювало в межах 8,05–8,50, що відповідало нормативу ГДК із незначною лужністю. Вміст сульфатів та хлоридів в період доочистки із застосуванням гідрофітів зменшився на 23,0% та 13,0% відповідно і становили при скиді очищених вод у акваторію річки 1,3 ГДК сульфатів та 1,06 ГДК хлоридів.

Високу ефективність застосування *Eichhornia crassipes* разом із *Lemna minor* зафіксовано у додатковій очистці каналізаційних вод від вмісту біогенних речовин. Неконтрольоване потрапляння у поверхневі води підвищеного вміст біогенних речовин із стічними водами являється однією із основних проблем погіршення трофічного стану акваторій водойм та річок та заростання їх синьо-зеленими водоростями. В результаті додаткової очистки вміст фосфатів у каналізаційно-стічних водах знизився на 83,3% – від $12,6 \pm 1,8$ мг/дм³ (3,60 ГДК) до $2,1 \pm 0,3$ мг/дм³ (0,60 ГДК), азот амонійний знизився на 75,8% – від $1,90 \pm 0,80$ мг/дм³ (3,80 ГДК) до $0,46 \pm 0,20$ мг/дм³ (0,92 ГДК), вміст азоту нітратного знизився на 68,5% – від $25,7 \pm 12,3$ мг/дм³ (0,64 ГДК) до $8,1 \pm 3,9$ мг/дм³ (0,20 ГДК). Незначна ступінь додаткового очищення у ставках-відстійниках гідрофітами зафіксовано наступних солей: вміст магнію знизився на 10,9% і становив 0,08 ГДК, кальцію на 13,8% і становив 0,72 ГДК, вміст натрію+калію знизився на 14,0% і становив 2,24 ГДК. Вміст нафтопродуктів знизився на 30,0% і становив 1,4 ГДК.

Таблиця 3. Динаміка значень гідрохімічних показників якості каналізаційних вод у ставках-відстійниках із додатковою очисткою за допомогою *Eichhornia crassipes* та *Lemna minor*

Показники якості води	Період очистки води, діб					Ефективність очистки за 40 діб, %
	0	10	20	30	40	
Завислі речовини, мг/дм ³	84,0±12,5	75,9±11,3	74,5±11,0	60,9±9,0	57,1±8,5	32,0
pH	8,50±0,30	8,05±0,28	8,25±0,29	8,30±0,29	8,30±0,29	–
Сухий залишок, мг/дм ³	1300±207	1245±198	1210±192	1170±185	1120±178	13,8
Сульфати, мг/дм ³	168,0±20,8	137,1±16,9	135,3±16,7	132,8±16,4	129,4±16,0	23,0
Хлориди, мг/дм ³	365,7±43,6	341,9±40,5	330,1±39,5	323,9±38,6	318,2±37,9	13,0
Фосфати, мг/дм ³	12,6±1,8	11,8±1,7	8,1±1,2	5,9±0,8	2,1±0,3	83,3
Кальцій, мг/дм ³	150,3±47,9	138,7±44,2	136,0±43,3	133,7±42,6	129,6±41,3	13,8
Магній, мг/дм ³	4,40±1,40	4,26±1,37	4,18±1,33	4,01±1,27	3,92±1,23	10,9
Натрій + Калій, мг/дм ³	313±69,6	291±64,7	282±62,6	275±61,2	269±59,9	14,0
Азот амонійний, мг/дм ³	1,90±0,80	1,22±0,51	0,83±0,31	0,62±0,24	0,46±0,20	75,8
Азот нітратний, мг/дм ³	25,7±12,3	18,3±8,8	14,9±7,1	10,2±4,9	8,1±3,9	68,5
Нафтопродукти, мг/дм ³	0,10±0,04	0,09±0,04	0,07±0,03	0,07±0,03	0,07±0,03	30,0
ХСК ₅ , мгО ₂ /дм ³	54,20±9,80	38,8±7,02	21,68±3,92	12,85±2,32	5,62±1,02	89,6
БСК ₅ , мгО ₂ /дм ³	14,50±2,17	13,9±2,08	6,83±1,02	6,10±0,91	5,62±0,84	61,2

Одним із головних показників, що характеризує ступінь і динаміку очищення або самоочищення забруднених стічних вод являється хімічне споживання кисню. Він визначається кількістю кисню, витраченого на окиснення забруднюючих хімічних речовин, що містяться в одиниці об'єму води, за певний час (5 діб – ХСК₅, 10 діб – ХСК₁₀ тощо). Найбільші значення окислювання властиві водам, які мають високий вміст біогенних речовин. Хімічне споживання кисню за 5 діб в результаті додаткового очищення гідрофітами знизилося на 89,6% – від 54,20±9,80 мгО₂/дм³ (27,1 ГДК) до 5,62±1,02 мгО₂/дм³ (2,81ГДК). Значення ХСК₅, при скиданні стічних вод в акваторію річки характеризувалося на межі класів «середня (5,0–10,0 мгО₂/дм³) – мала (2,0–5,0 мгО₂/дм³)» окислювання води. На ряду із ХСК₅ важливим показником ефективності очистки стічних вод є біохімічне споживання кисню (БСК), який характеризує кількість розчиненого кисню, що використовується водними організмами для кисневого розкладання органічних речовин, що надходять у воду для свого росту, розмноження і створення біомаси. Зокрема, значення БСК залежить від наявності у воді органічних забруднювачів. Зростання показника БСК призводить до дефіциту розчиненого кисню у воді, що негативно позначається на умовах життя водних організмів. Біохімічне споживання кисню за 5 діб в результаті додаткового очищення гідрофітами знизилося на 61,2% – від 14,50±2,17 мгО₂/дм³ (7,25 ГДК) до 5,62±0,84 мгО₂/дм³ (2,81 ГДК), що межує в класах «середня (5,0–10,0 мгО₂/дм³) – мала (2,0–5,0 мгО₂/дм³)» біологічного споживання кисню. Швидкість додаткового очищення каналізаційних стоків гідрофітами від поліутантів у ставках-відстійника математично описані у таблиці 4.

Таблиця 4. Функції швидкості очистки каналізаційних стоків гідрофітами *Eichhornia crassipes* та *Lemna minor*

Показники якості води	Функція	Кореляція, r	Детермінація, r ²
Завислі речовини, мг/дм ³	$y = -0,688t + 84,24$	0,974	0,948
Сухий залишок, мг/дм ³	$y = -4,35t + 1296$	0,997	0,995
Сульфати, мг/дм ³	$y = 0,0388t^2 - 2,3664t + 164,58$	0,946	0,895
Хлориди, мг/дм ³	$y = 0,0299t^2 - 2,3243t + 364,53$	0,995	0,991
Фосфати, мг/дм ³	$y = -0,269t + 13,48$	0,984	0,968
Кальцій, мг/дм ³	$y = 0,011t^2 - 0,904t + 149,14$	0,975	0,951
Магній, мг/дм ³	$y = -0,0121t + 4,396$	0,995	0,990
Натрій + Калій, мг/дм ³	$y = 0,0243t^2 - 2,0114t + 311,66$	0,993	0,987
Азот амонійний, мг/дм ³	$y = 0,0009t^2 - 0,0697t + 1,8763$	0,998	0,996
Азот нітратний, мг/дм ³	$y = 0,0066t^2 - 0,6987t + 25,429$	0,996	0,993
Нафтопродукти, мг/дм ³	$y = -0,0008t + 0,096$	0,894	0,800
ХСК ₅ , мгО ₂ /дм ³	$y = 1,7593t^2 - 22,867t + 75,878$	0,998	0,997
БСК ₅ , мгО ₂ /дм ³	$y = 0,47t^2 - 5,376t + 20,348$	0,936	0,877
t – час очищення каналізаційних вод від забруднювачів, доба			

У результаті застосування комбінованого очищення каналізаційно-стічних вод із застосуванням існуючої системи механічно-біологічної очистки та додаткового очищення гідрофітами *Eichhornia crassipes* та *Lemna minor* у період максимального водоспоживання та водовідведення, ефективність очистки стічних вод від токсичних солей та нафтопродуктів (рис. 2) варіює в межах 14,0–97,7%, від мінеральних та органічних поллютантів (рис. 3) в межах 96,0–99,0%.

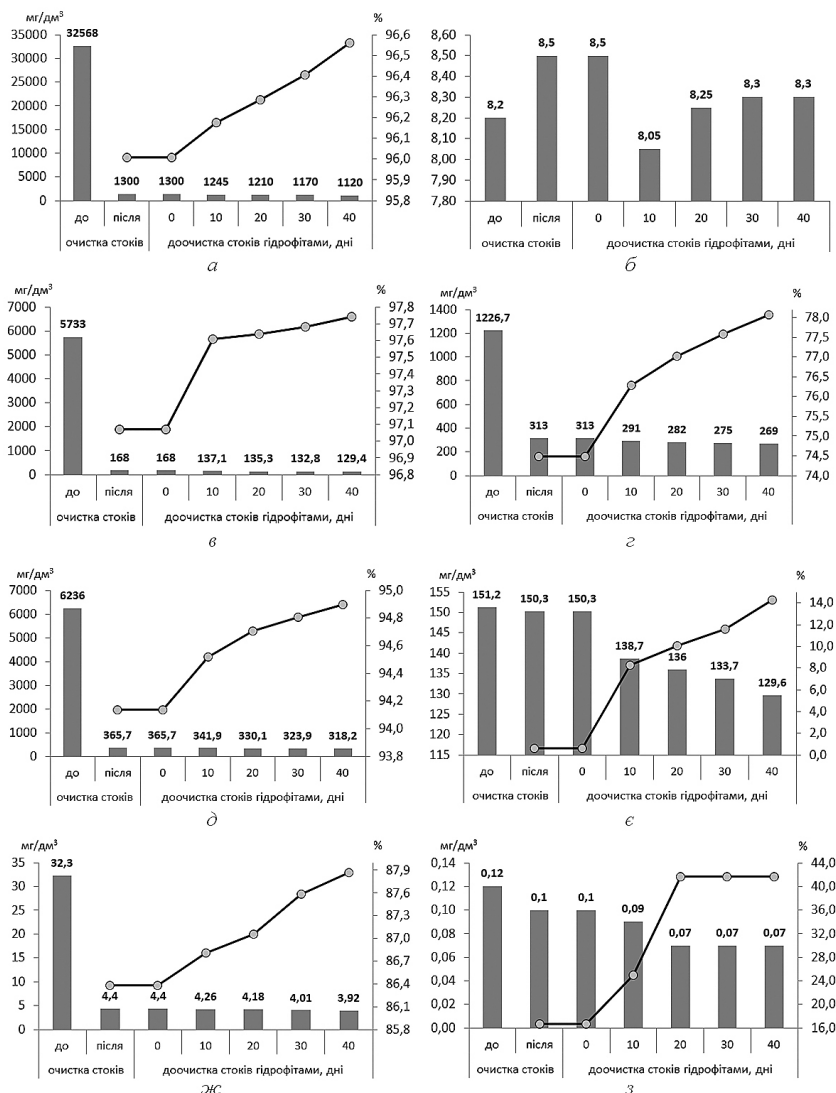


Рис. 2. Комбінована очистка каналізаційних стоків від солей та нафтопродуктів: а – сухий залишок; б – рН; в – сульфати; г – натрій + калій; д – хлориди; е – кальцій; ж – магній; з – нафтопродукти

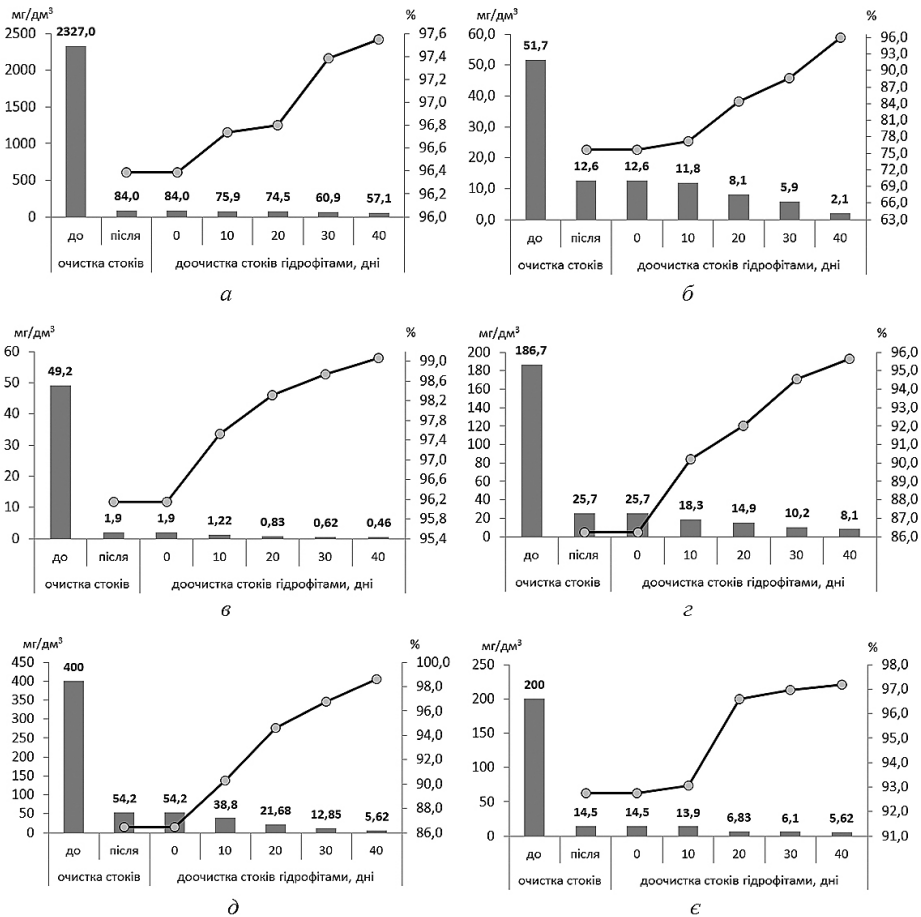


Рис. 3. Комбінована очистка каналізаційних стоків від мінеральних та органічних поліютантів: а – завислі речовини; б – фосфати; в – азот амонійний; г – азот нітратний; д – ХСК5; е – БСК5

За результатами дослідження встановлено, що фітомаса однієї рослини *Eichhornia crassipes* за 40 днів збільшилася на $14,5 \pm 8,6$ грам. Це обумовлено високим температурним режимом в літній період та надходженню на доочистку у ставки-накопичувачі каналізаційних вод із високою концентрацій біогенних речовин, які забезпечують добрі вегетаційні умови гідрофітів. Швидкість розмноження *Eichhornia crassipes* описується математичною функцією $y = 0,5e^{0,3466t}$. Загальна біопродуктивність гідрофітів у ставку-відстійнику за 40 днів додаткової очистки каналізаційних вод склала більше 12,5 тонн сирової маси, тобто $1,25 \text{ кг/м}^2$.

Встановлено, що склад зеленої маси *Eichhornia crassipes*, висаджених для додаткової очистки стічних водах, характеризувався високим

вмістом вологи (94,0–88,9%), протеїнів у межах 20–30 кг/т зеленої маси, азоту – 20–35 кг/т, фосфору – 12–17 кг/т, каротину – 35–40 кг/т. Гідрофіти *Eichhornia crassipes* та *Lemna minor* використовують в якості сидерату, для забезпечення кормами галузь тваринництва та рибництва.

Висновки. За результатами дослідження доведено високу ефективність використання *Eichhornia crassipes* разом із *Lemna minor* для додаткової очистки міських каналізаційних стоків. Ефективним є використання гідрофітів в літній період. Літній температурний режим зони Степу в межах 35,0–46,0 °C забезпечує прогрів каналізаційних вод у ставках-відстійниках від 26,0 до 34,5 °C, що обумовлює умови розвитку гідрофітів та споживання ними поллютантів із води. Встановлено, що існуюча системи очистки міських каналізаційних вод не повною мірою забезпечує умови очистки стоків, які надходять безпосередньо до акваторії річок. Вміст поллютантів у скидних каналізаційних водах після очистки за критеріями рибогосподарського призначення перевищувало рівень їх граничнодопустимої концентрації, зокрема: вмісту завислих речовин в 4,2 рази, фосфатів – 3,6 рази; сухого залишку – 1,3 рази; сульфатів – 1,7 рази; хлоридів – 1,2 рази; натрію+калію – 2,6 рази; азоту амонійного – 3,8 рази; нафтопродуктів – 2,0 рази. В результаті експериментального розміщення *Eichhornia crassipes* та *Lemna minor* у ставку-відстійнику підвищило ефективність додаткової очистки каналізаційно-стічних вод. Зокрема, ефективність доочистки у ставках-відстійниках залишку завислих речовин за 40 днів склала 32%, від токсичних солей в межах 13,0–23,0%, нафтопродуктів – 30,0%, біогенних речовин – 68,5–83,3%. Це призвело до зменшення значення хімічного та біологічного споживання кисню за 5 діб на 89,6% та 61,2% відповідно. Ефективність очистки стічних вод від токсичних солей та нафтопродуктів сягало 97,7%, від мінеральних та органічних поллютантів до 99,0%, це значно підвищило якість скидних вод за рибогосподарськими критеріями. Зокрема, враховуючи високу поживну цінність *Eichhornia crassipes* та *Lemna minor*, було одержано 12,5 тонн сирої маси гідрофітів для їх використання у якості сидератів, кормів для сільськогосподарських тварин, птиці та риби.

USE OF *EICHHORNIA CRASSIPES* AND *LEMNA MINOR* FOR ADDITIONAL TREATMENT OF MUNICIPAL DRAINS

Pichura V.I. – Doctor of Agricultural Sciences, Professor,
Potravka L.O. – Doctor of Economics, Professor
Kherson State Agrarian and Economic University
pichuravitalii@gmail.com, potravkalarisa@gmail.com

At the present stage of drainage and treatment of municipal and many other types of wastewater in Ukraine mainly have been used traditional technologies of biological treatment in aeration tanks by aerobic oxidation with the participation of activated sludge, which are characterized by low efficiency. Discharges of untreated and conditionally treated waters have led to anaerobic processes, decay, organic pollution, which caused unsuitability of reservoirs and watercourses of sewage receivers for water usage, led to fish death, flowering and overgrowth.

It was determined that efficient biological technologies for cleaning and post-treatment of wastewaters, as a transfer of water pollution. In condition of the growing level of anthropogenic pressure on water resources, ecological, biological and economic justification for the usage of the higher aquatic plants to ensure biological treatment of sewage and waste waters was relevant. The object of the investigation was the process of reducing the capacity of the sewerage-wastewaters of Kherson area from the flooding of the higher aquatic plants. Studies of the quality of sewage and wastewater treatment efficiency were conducted in three stages: Stage I – "state before treatment", Stage II – "state after mechanical and biological treatment" of existing municipal treatment plants, Stage III – "state after additional treatment with hydrophytes". *Eichhornia crassipes* (water hyacinth) and perennial aquatic plant *Lemna minor* were planted in one settling pond to determine the efficiency of using hydrophytes for additional cleaning.

As a result of the conducted experiment the high efficiency of usage of hydrophytes for additional sewage treatment was determined. In particular, the efficiency of additional treatment in the settling ponds of the residue of suspended solids for 40 days was 32%, from toxic salts in the range of 13.0–23.0%, petroleum products – 30.0%, nutrients – 68.5–83.3%. It has led to a decrease in the value of chemical and biological oxygen consumption for 5 days by 89.6% and 61.2%, respectively. The efficiency of wastewater treatment from toxic salts and petroleum products has reached 97.7%, from mineral and organic pollutants up to 99%, which significantly improved the quality of wastewater according to fishery criteria. In particular, including the high nutritional value of *Eichhornia crassipes* and *Lemna minor*, 12.5 tons of raw hydrophytes were obtained, which could be used as green manure, feed for farm animals, poultry and fish.

Keywords: water quality, sewer drain, treatment systems, *Eichhornia crassipes*, *Lemna minor*, pollutants, water treatment.

ЛІТЕРАТУРА

1. Pichura V.I., Malchykova D.S., Ukrainskij P.A., Shakhman I.A., Bystriantseva A.N. Anthropogenic Transformation of Hydrological Regime of the Dnieper River. *Indian Journal of Ecology*. 2018. Vol. 45(3). pp. 445–453.

2. Pichura V., Potravka L., Skok S., Vdovenko N. Causal Regularities of Effect of Urban Systems on Condition of Hydro Ecosystem of Dnieper River. *Indian Journal of Ecology*. 2020. Vol. 47(2). pp. 273–280.
3. Lisetskii F.N., Pichura V.I., Pavlyuk Y.V., Marinina O.A. Comparative assessment of methods for forecasting river runoff with different conditions of organization. *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*. 2015. Vol. 6(4). pp. 56–60.
4. Lisetskii F., Polshina M., Pichura V., Marinina O. Limatic factor in long-term development of forest ecosystems. *International Multidisciplinary Scientific Geo Conference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM*, 2017. Vol. 17(32). pp. 765–774.
5. Pichura V.I., Domaratsky Y.A., Yaremko Yu.I., Volochnyuk Y.G., Rybak V.V. Strategic Ecological Assessment of the State of the Transboundary Catchment Basin of the Dnieper River Under Extensive Agricultural Load. *Indian Journal of Ecology*. 2017. Vol. 44(3). pp. 442–450.
6. Dudiak N.V., Pichura V.I., Potravka L.A., Stroganov A.A. Spatial modeling of the effects of deflation destruction of the steppe soils of Ukraine. *Journal of Ecological Engineering*. 2020. Vol. 21(2). pp. 166–177.
7. Dudiak N., Pichura V., Potravka L., Stratchuk N. Environmental and economic effects of water and deflation destruction of steppe soil of Ukraine. *Journal of Water and Land Development*. 2021. Vol. 50(VI–IX). Pp. 11–27.
8. Pichura V.I., Potravka L.A., Skrypchuk P.M., Stratchuk N.V. Anthropogenic and climatic causality of changes in the hydrological regime of the Dnieper river. *Journal of Ecological Engineering*. 2020. Vol. 21(4). pp. 1–10.
9. Pichura V., Potravka L., Dudiak N., Vdovenko N. (2021). Space–Time Modeling of Climate Change and Bioclimatic Potential of Steppe Soil. *Indian Journal of Ecology*. 2021. Vol. 48(3). pp. 671–680.
10. Deffontis S., Breton A., Vialle C., Montréjaud–Vignoles M., Vignoles C., Sablayrolles C. Impact of dry weather discharges on annual pollution from a separate storm sewer in Toulouse, France. *Science of the Total Environment*. 2013. Vol. 452–453. pp. 394–403.
11. Becouze–Lareure C., Thiebaud L., Bazin C., Namour P., Breil P., Perrodin Y. Dynamics of toxicity within different compartments of a peri–urban river subject to combined sewer overflow discharges. *Science of the Total Environment*. 2016. Vol. 539. pp. 503–514.
12. Beckers L.–M., Busch W., Krauss M., Schulze T., Brack W. Characterization and risk assessment of seasonal and weather dynamics in organic pollutant mixtures from discharge of a separate sewer system. *Water Research*. 2018. Vol. 135. pp. 122–133.

13. Пічура В.І. Басейнова організація природокористування на водозбірній території транскордонної річки Дніпро. Херсон : «ОЛДІ-ПЛЮС». 2020. 380 с.
14. Carbiner R., Tremolieres M., Mercier S. (1990). Aquatic macrophyte communities as bioindicators of eutrophication in calcareous oligosaprobe stream waters. *Vegetatio*. 1990. Vol. 86. pp. 71–88.
15. Eidab E.M., Shaltout K.H., Almuqrind A.H., Alorainid D.A., Khedheref K.M., Taherag M.A., Alfarhanh A.H., Picó Y., Barcelohj D. Uptake prediction of nine heavy metals by *Eichhornia crassipes* grown in irrigation canals: A biomonitoring approach. *Science of the Total Environment*. 2021. Vol. 782, 146887.
16. Mònica E., Matamoros C.V. Linking plant–root exudate changes to micropollutant exposure in aquatic plants (*Lemna minor* and *Salvinianatans*). A prospective metabolomic study. *Chemosphere*. 2022. Vol. 287(1), 132056.
17. Zimmles Y., Kirzhner F., Malkovskaja A. Application of *Eichhornia crassipes* and *Pistiastratiotes* for treatment of urban sewage in Israel. *Journal of Environmental Management*. 2006. Vol. 81. pp. 420–428.
18. Wangb F., Gaoa J., Zhaia W., Cuia J., Huaa Y., Zhoua Z., Liua D., Wanga P., Zhangc H. Accumulation, distribution and removal of triazine pesticides by *Eichhornia crassipes* in water–sediment microcosm. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2021. Vol. 219, 112236.
19. Imron M.F., Ananta A.R., Ramadhani I.S., Kurniawan S.B., Abdullah S.R.S. (2021). Potential of *Lemna minor* for removal of methylene blue in aqueous solution: Kinetics, adsorption mechanism, and degradation pathway. *Environmental Technology & Innovation*. 2021. Vol. 24, 101921.
20. Sheludchenko B.A. Engineering ecology. Textbook part II Hydrosphere. Zhytomyr, Volyn State Agrarian University. 2001. 220 p.
21. Гранично допустимі значення показників якості води для рибогосподарських водойм. Загальний перелік гранично допустимих концентрацій та орієнтовно допустимих рівнів шкідливих речовин у воді рибогосподарських водойм. Київ, Міністерство рибного господарства СССР, 12–04–11. 1990. 45 с.
22. Екологічна оцінка якості поверхневих вод суші та лиманів України. Методологія. Київ, Керівний нормативний документ, 211.1.4.010–94. 1994. 37 с.

REFERENCES

1. Pichura V.I., Malchykova D.S., Ukrainskij P.A., Shakhman I.A., Bystriantseva A.N. (2018). Anthropogenic Transformation of Hydrological Regime of the Dnieper River. *Indian Journal of Ecology*, vol. 45(3), 445–453.

2. Pichura V., Potravka L., Skok S., Vdovenko N. (2020). Causal Regularities of Effect of Urban Systems on Condition of Hydro Ecosystem of Dnieper River. *Indian Journal of Ecology*, vol. 47(2), 273–280.
3. Lisetskii F.N., Pichura V.I., Pavlyuk Y.V., Marinina O.A. (2015). Comparative assessment of methods for forecasting river runoff with different conditions of organization. *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*, vol. 6(4), 56–60.
4. Lisetskii F., Polshina M., Pichura V., Marinina O. (2017). Limatic factor in long-term development of forest ecosystems. *International Multidisciplinary Scientific Geo Conference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM*. Vol. 17(32), 765–774.
5. Pichura V.I., Domaratsky Y.A., Yaremko Yu.I., Volochnyuk Y.G., Rybak V.V. (2017). Strategic Ecological Assessment of the State of the Transboundary Catchment Basin of the Dnieper River Under Extensive Agricultural Load. *Indian Journal of Ecology*, vol. 44(3), 442–450.
6. Dudiak N.V., Pichura V.I., Potravka L.A., Stroganov A.A. (2020). Spatial modeling of the effects of deflation destruction of the steppe soils of Ukraine. *Journal of Ecological Engineering*, vol. 21(2), 166–177.
7. Dudiak N., Pichura V., Potravka L., Strachuk N. (2021). Environmental and economic effects of water and deflation destruction of steppe soil of Ukraine. *Journal of Water and Land Development*, vol. 50(VI–IX), 11–27.
8. Pichura V.I., Potravka L.A., Skrypchuk P.M., Strachuk N.V. (2020). Anthropogenic and climatic causality of changes in the hydrological regime of the Dnieper river. *Journal of Ecological Engineering*, vol. 21(4), 1–10.
9. Pichura V., Potravka L., Dudiak N., Vdovenko N. (2021). Space-Time Modeling of Climate Change and Bioclimatic Potential of Steppe Soil. *Indian Journal of Ecology*, vol. 48(3), 671–680.
10. Deffontis S., Breton A., Vialle C., Montréjaud–Vignoles M., Vignoles C., Sablayrolles C. (2013). Impact of dry weather discharges on annual pollution from a separate storm sewer in Toulouse, France. *Science of the Total Environment*, vol. 452–453, 394–403.
11. Becouze–Lareure C., Thiebaud L., Bazin C., Namour P., Breil P., Perrodin Y. (2016). Dynamics of toxicity within different compartments of a peri-urban river subject to combined sewer overflow discharges. *Science of the Total Environment*, vol. 539, 503–514.
12. Beckers L.–M., Busch W., Krauss M., Schulze T., Brack W. (2018). Characterization and risk assessment of seasonal and weather dynamics in organic pollutant mixtures from discharge of a separate sewer system. *Water Research*, vol. 135, 122–133.
13. Pichura V.I. (2020). *Basejnova organizacija pryrodokorystuvannja na vodozbirnij terytorii' transkordonnoi' richky Dnipro* [Basin organization

- of nature use on the catchment area of the Dnieper transboundary river]. Kherson, OLDI-PLUS. [in Ukrainian].
14. Carbiner R., Tremolieres M., Mercier S. (1990). Aquatic macrophyte communities as bioindicators of eutrophication in calcareous oligosaprobe stream waters. *Vegetatio*, vol. 86, 71–88.
 15. Eidab E.M., Shaltout K.H., Almuqrind A.H., Alorainid D.A., Khedheref K.M., Taherag M.A., Alfarhanh A.H., Picó Y., Barcelohj D. (2021). Uptake prediction of nine heavy metals by *Eichhornia crassipes* grown in irrigation canals: A biomonitoring approach. *Science of the Total Environment*, vol. 782, 146887.
 16. Mònica E., Matamoros C.V. (2022). Linking plant–root exudate changes to micropollutant exposure in aquatic plants (*Lemna minor* and *Salvinianatans*). A prospective metabolomic study. *Chemosphere*, vol. 287(1), 132056.
 17. Zimmles Y., Kirzhner F., Malkovskaja A. (2006). Application of *Eichhornia crassipes* and *Pistiastratiotes* for treatment of urban sewage in Israel. *Journal of Environmental Management*, vol. 81, 420–428.
 18. Wangb F., Gaoa J., Zhaia W., Cuia J., Huaa Y., Zhoua Z., Liua D., Wanga P., Zhanga H. (2021). Accumulation, distribution and removal of triazine pesticides by *Eichhornia crassipes* in water–sediment microcosm. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, vol. 219, 112236.
 19. Imron M.F., Ananta A.R., Ramadhani I.S., Kurniawan S.B., Abdullah S.R.S. (2021). Potential of *Lemna minor* for removal of methylene blue in aqueous solution: Kinetics, adsorption mechanism, and degradation pathway. *Environmental Technology & Innovation*, vol. 24, 101921.
 20. Sheludchenko B.A. (2001). *Engineering ecology*. Textbook part II Hydrosphere. Zhytomyr, Volyn State Agrarian University. [in Ukrainian].
 21. *Granychno dopustymi znachennja pokaznykiv yakosti vody dlja rybogospodars'kyh vodojm. Zagal'nyj perelek granychno dopustymyh koncentracij ta orijentovno dopustymyh rivniv shkidlyvyh rehovyn u vodi rybogospodars'kyh vodojm* (1990). [Maximum permissible values of water quality indicators for fishery reservoirs. General list of maximum permissible concentrations and approximate permissible levels of harmful substances for water in fishery reservoirs]. Kyiv, Ministry of Fisheries of the USSR, 12–04–11, 45. [in Ukrainian].
 22. *Ekologichna ocinka yakosti poverhnevyyh vod sushi ta lymaniv Ukrai'ny* (1994). [Ecological assessment of surface water quality of land and estuaries of Ukraine]. Methodology. Kyiv, Guiding Normative Document, 211.1.4.010–94, 37. [in Ukrainian].