

ІННОВАЦІЙНІ ПІДХОДИ ДО ОЧИЩЕННЯ УРБАНІЗОВАНИХ СТІЧНИХ ВОД ЗА ДОПОМОГОЮ ФІТОБІОРЕМЕДІАЦІЙНИХ СИСТЕМ CONSTRUCTED WETLANDS

Богданов І. С.

Одеський національний технологічний університет
вул. Канатна, 112, 65039, м. Одеса
gibarian77@gmail.com

У статті представлено аналітичний огляд сучасних тенденцій та інноваційних технологій очищення урбанізованих стічних вод на основі фітобіореємедіації (Constructed Wetlands, CW). Проаналізовано ефективність функціонування біоплато в Харківському регіоні та узагальнено міжнародний досвід упровадження подібних систем у різних кліматичних і техногенних умовах. Визначено потенціал адаптації CW до національних екологічних і гідрологічних особливостей з метою реабілітації територій, забруднених унаслідок інтенсивної урбанізації та техногенного навантаження.

Особливу увагу приділено інтеграції біоплато з фотобіореєрторами (CW + PBR), що підвищує ефективність видалення органічних речовин, сполук азоту та фосфору, а також забезпечує можливість отримання якісно очищеної води для технічного водопостачання. Комбіновані системи сприяють також усуненню мікрозабрудників, характерних для міських стоків, а сформована біомаса може бути використана для виробництва біодобрив та біоенергетичної сировини. Додатково підкреслюється важливість оптимізації гідравлічних режимів цих систем, оскільки саме вони визначають стабільність протікання основних біогеохімічних процесів.

Розглянуто перспективи впровадження плаваючих фітоочисних платформ (Floating Treatment Wetlands), ефективних у високонавантажених урбанізованих водних системах, що характеризуються обмеженим простором для розміщення очисної інфраструктури та значними коливаннями гідрологічних параметрів. Підкреслено, що CW відіграють важливу роль у відновленні водних екосистем, порушених техногенними впливами та наслідками воєнних дій, зокрема забрудненням важкими металами, нафтопродуктами й мікропластиком.

Стаття містить рекомендації щодо підбору видового складу рослин та конструктивних параметрів систем, що підтверджують їхню високу адаптивність до українських умов і демонструють значний потенціал для підвищення ефективності управління водними ресурсами та зміцнення екологічної безпеки. *Ключові слова:* фітобіореємедіація, біоплато, Constructed Wetlands, CW, Floating Treatment Wetlands, FTW, урбанізовані території, очищення стічних вод, екологічна безпека.

Innovative approaches to the treatment of urban wastewater using phytobioremediation systems (Constructed Wetlands). Bohdanov I.

The article presents an analytical review of current trends and innovative technologies for urban wastewater treatment based on phytobioremediation (Constructed Wetlands, CW). The efficiency of bioplateau functioning in the Kharkiv region is analyzed, and international experience in implementing similar systems under various climatic and technogenic conditions is generalized. The potential for adapting CW to national ecological and hydrological conditions is identified for the rehabilitation of territories contaminated by intensive urbanization and technogenic loads.

Particular attention is paid to the integration of bioplateaus with photobioreactors (CW + PBR), which increases the efficiency of removing organic matter, nitrogen, and phosphorus, and enables the production of high-quality treated water for technical water supply. Combined systems also contribute to the elimination of micropollutants characteristic of urban effluents, and the resulting biomass can be used to produce biofertilizers and bioenergy raw materials. Additionally, the importance of optimizing the hydraulic regimes of these systems is emphasized, as they determine the stability of the main biogeochemical processes.

The prospects for implementing floating treatment wetlands (FTW) are considered, which are effective in heavily loaded urban water systems characterized by limited space for treatment infrastructure placement and significant fluctuations in hydrological parameters. It is emphasized that CW play an essential role in restoring aquatic ecosystems disrupted by technogenic impacts and consequences of military actions, particularly contamination with heavy metals, petroleum products, and microplastics.

The article contains recommendations for selecting plant species composition and system structural parameters, which confirm their high adaptability to Ukrainian conditions and demonstrate significant potential to improve water resource management efficiency and strengthen environmental safety. *Key words:* phytobioremediation, bioplateau, Constructed Wetlands, CW, Floating Treatment Wetlands, FTW, urban areas, wastewater treatment, environmental safety.

Постановка проблеми. Проблема якості водних ресурсів набула критичного значення для України в умовах зростаючої урбанізації та техногенного навантаження. За результатами даних Державного агентства водних ресурсів України, у водні об'єкти щорічно скидають близько 8 млрд м³ стічних вод, у тому числі до 2 млрд м³ забруднених. Понад 60 % від усіх стоків надходять від промислових об'єктів [1].

Сьогодні поверхневі стоки урбанізованих територій містять високі концентрації важких металів (свинець, кадмій, ртуть, хром), органічних сполук та інших токсичних речовин, що знижує природну здатність водних екосистем до відновлення [2]. Традиційні методи очищення стічних вод – механічні, фізико-хімічні та біологічні – поступово втрачають ефективність через технологічні, економічні та екологічні обмеження. Діючі очисні споруди вилучають лише незначну частину неорганічних речовин і практично не затримують солі важких металів [3].

Воєнні дії додатково ускладнили ситуацію, призвівши до потрапляння у стічні води залишків вибухових речовин, важких вуглеводнів, мікропластику та паливно-мастильних матеріалів [4]. За цих умов особливої актуальності набувають природоорієнтовані технології очищення води, зокрема системи штучно створених водно-болотних угідь (Constructed Wetlands, CW).

Constructed Wetlands поєднують природні процеси фільтрації, біосорбції та фотосинтетичної активності, що забезпечує ефективне очищення стічних вод при мінімальних енерговитратах [5, 6]. Ці системи є економічно ефективними та стійкими, оскільки поєднують фізичні, хімічні та біологічні механізми видалення забруднень [5].

Крім того, CW можуть бути адаптовані в різних конфігураціях та інтегровані з іншими технологіями, зокрема фотобіореакторами, що дозволяє підвищити ефективність видалення органічних речовин, сполук азоту та фосфору [6]. Використання таких комбінованих підходів створює можливість повторного використання очищеної води у системах технічного водопостачання та сприяє зменшенню експлуатаційних витрат [5, 6].

Актуальність дослідження. Особлива актуальність фітобіоре mediaції в Україні зумовлена розташуванням більшості населених пунктів на евтрофованих водних об'єктах («уразливі зони» за Директивами ЄС). Антропогенне евтрофування погіршує якість води та негативно впливає на ґрунт і атмосферу [7].

Крім того, зростання техногенного навантаження внаслідок воєнних дій в Україні зумовлює нагальну потребу у впровадженні природоорієнтованих технологій очищення води.

Constructed Wetlands (CW) є ефективним, енергоощадним і екологічно безпечним методом стабілізації якості поверхневих стічних вод. Світовий та український досвід експлуатації систем CW свідчить

про їхню стабільну ефективність у різних кліматичних зонах і типах стічних вод.

В українських умовах потреба у впровадженні таких технологій є особливо актуальною. Більшість очисних споруд у країні експлуатуються понад проектний термін, значна їх частина перебуває в аварійному стані, а руйнування інфраструктури внаслідок воєнних дій призвели до додаткового навантаження на водні екосистеми.

Водночас енергетичні обмеження знижують ефективність роботи традиційних технологій очищення. За цих умов системи Constructed Wetlands є стратегічно важливими для переходу до сталих, енергоефективних і екологічно безпечних методів водовідведення, що сприяють зменшенню техногенного навантаження на водні ресурси.

Зв'язок авторського доробку з важливими науковими та практичними завданнями. Авторський доробок спрямований на систематизацію сучасних наукових підходів і міжнародного досвіду застосування систем Constructed Wetlands (CW) та інтегрованих технологій CW + Photobioreactors (PBR) для очищення урбанізованих і техногенно навантажених стічних вод.

У роботі підкреслено наукову і практичну значущість інтеграції макрофітів, мікробних консорціумів і мікроводоростей як складових єдиної біотехнологічної системи, що підвищує ефективність видалення органічних речовин, сполук азоту, фосфору, важких металів і мікрозабрудників.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз світового досвіду застосування інноваційних рішень щодо систем CW для очищення стічних вод проводився з урахуванням перспектив упровадження таких систем в Україні. Особливий акцент зроблено на новаторській інтеграції природних систем і передових технологій для вирішення проблем у сфері управління стічними водами.

У роботі враховано наукові та літературні дані щодо використання технології біоплато в різних країнах, а також результати українських досліджень і звітів, що висвітлюють ефективність експлуатації штучних водно-болотних угідь у вітчизняних умовах. Крім того, для аналізу було використано експериментальні дані, які відображають рівень очищення за основними показниками (БПК, ХСК, азот, фосфор, завислі речовини) та дають змогу оцінити потенціал впровадження таких систем у різних кліматичних регіонах України. Особливу увагу приділено результатам багаторічних спостережень за роботою біоплато в Харківському регіоні, які підтверджують стабільну ефективність технології навіть за умов сезонних коливань температури та зміни гідрологічного режиму.

Аналіз світових джерел показав, що системи CW і FTW успішно застосовуються в Європі, Азії та Америці для очищення міських, промислових і зливових стічних вод, демонструючи високі показники видалення біогенних елементів і органічних забрудню-

вачів. Отримані дані підтверджують доцільність інтеграції цих природоорієнтованих технологій у систему екологічної безпеки водних ресурсів України.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Попри значний обсяг міжнародних досліджень, низка ключових аспектів застосування фітобіоре mediaційних систем для очищення урбанізованих стічних вод в умовах України залишається недостатньо вивченою. Проведений аналіз показав, що ефективність штучних водно-болотних систем, плаваючих фітоочисних платформ та інтегрованих комплексів із фотобіореакторами у вітчизняних кліматичних і гідрологічних умовах досліджена фрагментарно. Особливо бракує даних щодо впливу сезонних температурних коливань, зміни хімічного складу стоків та локальних кліматичних факторів на стабільність очищення. Недостатньо з'ясованими залишаються оптимальний видовий склад макрофітів і мікробіодоростей, а також можливості подальшого використання отриманої рослинної та мікробної маси, що ускладнює розробку ресурсноефективних технологічних рішень та їх адаптацію до урбанізованих територій України.

Новизна. Уперше для українських умов обґрунтовано інтегровані модульні системи CW+PBR та плаваючі водно-болотні модулі (FTW) як адаптивні технології для різних сценаріїв: тимчасове очищення під час відновлення інфраструктури, модернізація застарілих очисних споруд та автономне децентралізоване водовідведення. Такі системи забезпечують ефективне очищення урбанізованих, зливових та техногенно забруднених стічних вод при високій гнучкості й енергоефективності.

Методологічне та загальнонаукове значення дослідження. Методологічне та загальнонаукове значення дослідження полягає у системній оцінці Constructed Wetlands з точки зору їх практичного застосування та у використанні літературних даних для аналізу ефективності систем і визначення перспектив їх інтеграції та гібридизації. Дослідження свідчать, що природоорієнтовані технології ефективно здійснюють очистку води та мінімізують негативний вплив на довкілля, створюючи передумови для впровадження інноваційних і екологічно безпечних технологічних рішень.

Викладення основного матеріалу. Штучно створені водно-болотні угіддя – це інженерні екосистеми, створені для імітації природних водно-болотних угідь, які використовують вищі водні рослини (макрофіти), субстрат та пов'язані мікробні спільноти для колективного видалення забруднювачів через взаємопов'язані фізичні, хімічні та біологічні процеси [8].

Системи CW класифікують за типом водного потоку на горизонтальні та вертикальні, а за характером розміщення рослин – на системи з поверхневим потоком, підповерхневим потоком та плаваючі модулі. Кожен тип має специфічні переваги та оптимальні умови застосування [8].

Перші експериментальні біоплато в Україні були впроваджені у Харківському регіоні у 1992 р. Довготривала експлуатація цих систем підтвердила їхню стабільну ефективність навіть за умов значних сезонних коливань температури. Дослідження показали високу ефективність видалення основних забруднювачів: біохімічного та хімічного споживання кисню, зважених речовин, а також сполук азоту та фосфору. Зафіксовані середні показники очищення: БПК $\approx 82,6 \pm 11$ %, ХСК $\approx 77,3 \pm 9$ %, зважені речовини $\approx 72,1 \pm 9$ %, видалення загального азоту 70 %, та видалення загального фосфору – 72 % [9].

Важливим результатом українських досліджень стало підтвердження можливості повторного використання осадів CW як органо-мінеральних добрив [10]. Це відкриває перспективи для замкнутого циклу використання ресурсів та підвищує економічну привабливість технології.

Крім того, було проведено районування території України для визначення оптимальних умов впровадження фітотехнологій з урахуванням кліматичних та гідрологічних особливостей регіонів [11]. Досвід експлуатації показав, що системи CW зберігають працездатність навіть у складних умовах східноукраїнського клімату з холодними зимами та посушливим літом. Це свідчить про високу адаптивність технології та можливість її широкого впровадження в різних регіонах країни.

Найбільш перспективним напрямом розвитку технологій фіторе mediaції є створення інтегрованих систем, що поєднують Constructed Wetlands з фотобіореакторами на основі мікробіодоростей (CW + PBR), забезпечуючи синергійний ефект і значно підвищену ефективність очищення порівняно з традиційними системами. Як зазначають у дослідженні [12], інтегрована система, що поєднує мікробіодорослевий ставок із штучним водно-болотним угіддям, демонструвала підвищену ефективність видалення забруднювачів та кращий вплив на зменшення вуглецю порівняно з іншими альтернативами, такими як суміжні системи або окремі CW. Інше дослідження показало, що експериментальна установка «штучні водно-болотні угіддя + фотобіореактор з мікробіодоростями» забезпечила видалення органічних речовин, загального азоту, загального фосфору та твердих часток на рівні 96,6 %, 76,6 %, 89,8 % та 99,9 % відповідно [13]. У фотобіореакторах середня ефективність видалення азоту становить близько 65 %, а у літній період може досягати 90 %, тоді як видалення фосфору перевищує 95 % незалежно від сезону [14].

Дослідження також показали, що гібридні системи, які поєднують плаваючі, вертикальні та горизонтальні проточні водно-болотні угіддя для очищення міських стічних вод, демонструють високу ефективність видалення поживних речовин: середня швидкість видалення становить 94,0 % загального фосфору, 93,8 % амонійного азоту, 93,8 % загального азоту, 80,0 % розчиненого органічного вуглецю,

84,0 % біохімічної потреби у кисні, 77,0 % хімічної потреби у кисні та 99,7 % змутненості води [15].

Ефективність систем CW значною мірою визначається правильним підбором видового складу макрофітів, оскільки рослини регулюють інтенсивність біохімічних процесів у ризосфері, забезпечують структурну підтримку біоплато та безпосередньо поглинають забруднювачі. Вищі водні рослини у штучних водно-болотних угіддях здатні видаляти з води різні забруднювальні речовини, зокрема біогенні елементи, важкі метали, феноли, сульфати, а також зменшувати забруднення нафтопродуктами та синтетичними поверхнево-активними речовинами.

Для помірного клімату в Україні оптимальними для систем фітобіоре mediaції є очерет *Phragmites australis* (Cav.) Steud., комиш лісовий *Scirpus sylvaticus* L. та рогіз широколистий *Typha latifolia* L., що підтверджується українськими дослідженнями [9]. Ці види добре адаптовані до місцевих умов, формують потужну кореневу систему та ефективно поглинають біогенні елементи й важкі метали.

Іншим інноваційним напрямом розвитку фіторе mediaційних технологій є впровадження плаваючих екосистемних модулів (Floating Treatment Wetlands, FTW). Молоді рослини ростуть на килимку, що плаває на поверхні води, а не вкорінюються в донних відкладах [16].

FTW мають низку унікальних переваг. По-перше, вони не потребують виділення земельних ділянок, що є особливо важливим для щільної міської забудови. По-друге, ці системи автоматично адаптуються до змін рівня води, зберігаючи ефективність очищення. По-третє, плаваючі модулі відзначаються мобільністю – їх легко встановлювати, демонтувати та масштабувати залежно від умов експлуатації.

Ці інноваційні установки діють як біофільтри, що забезпечують видалення забруднювачів завдяки комплексній дії: прямому поглинанню рослинами; біодеградації органічних речовин мікроорганізмами біоплівки, пов'язаних із кореневою системою; осадженню завислих часток [17]. Завдяки такому багатфункціональному механізму FTW здатні ефективно очищувати побутові, дощові та промислові стічні води, а також рекультивувати забруднені річки без порушення існуючих екосистем. Їх гідропонна плаваюча конструкція дозволяє стабільно працювати навіть за коливань рівня води та різних швидкостей течії, що робить систему придатною для річкових умов [17]. Експериментальні дослідження показали, що система FTW, заснована на комбінації чотирьох видів макрофітів (*Phragmites australis*, *Typha domingensis*, *Leptochloa fusca*, *Brachiaria mutica*) та мікробного консорціуму з 10 штамів вуглеводнерозкладаючих бактерій, демонструє високу ефективність очищення: вуглеводні – 99,1 %, важкі метали – 80 %, ХСК – 97,4 %, БПК – 98,9 %, при цьому суттєво покращується прозорість води та знижується концентрація завислих речовин [18]. Водночас вони

сприяють формуванню сприятливого середовища для водних і наземних організмів, підтримують біорізноманіття та інтегруються в концепцію «зеленої» урбаністики, поєднуючи екологічну, рекреаційну та естетичну функції.

Кожен тип фітобіоре mediaційних систем має свої переваги та може застосовуватися залежно від складу й концентрації забруднювачів. Зокрема, FTW доцільно використовувати для первинного очищення нафтовмісних і органічно забруднених стоків, тоді як інтегровані системи CW + PBR є ефективнішими для глибокого видалення біогенних елементів, поліциклічних ароматичних вуглеводнів (PAHs), важких металів та мікропластику.

У сучасних умовах, коли стічні води містять залишки паливно-мастильних матеріалів, вибухових речовин і мікропластику, впровадження таких систем є доцільним. Вони виконують роль природних буферних зон, стабілізують якість поверхневих вод, зменшують вуглецевий слід і підтримують біорізноманіття урбанізованих територій. Водночас утворена біомаса мікроводоростей може бути використана як вторинний ресурс для виробництва біогазу, біодобрив або біостимуляторів росту рослин [10], що підвищує економічну доцільність технології.

Головні висновки. Аналіз ефективності систем CW показав, що українські установки демонструють стабільне, але дещо нижче порівняно з європейськими показники очищення (БПК – 70–82 %, загальний азот і фосфор – 70–72 %), що зумовлено впливом континентального клімату, сезонними коливаннями температури та специфікою складу промислових стічних вод. Водночас досвід експлуатації вітчизняних систем підтверджує їхню надійність і енергоефективність у довгостроковій перспективі.

Сучасні наукові тенденції вказують, що впровадження гібридних CW-систем (поєднання вертикальних і горизонтальних потоків), а також інтеграція фотобіореакторів (CW + PBR) та плаваючих модулів (FTW) може істотно підвищити ефективність очищення. Такі природоорієнтовані комплекси забезпечують не лише видалення органічних речовин, азоту та фосфору, а й здатні ефективно утримувати важкі метали та відновлювати біогени через біомасу макрофітів і мікроводоростей.

Перспективи використання результатів дослідження. Перспективним напрямом для України є адаптація CW – технологій до локальних кліматичних і гідрологічних умов – зокрема, застосування теплоізольованих субстратів, підземних модулів і видів рослин, стійких до низьких температур (наприклад, *Phragmites australis*, *Typha latifolia*, *Scirpus sylvaticus*). Отже, Constructed Wetlands мають потенціал стати ключовим елементом екологічної модернізації систем водопостачання та водовідведення України, забезпечуючи сталий баланс між технологічною ефективністю, природними процесами та енергетичною економічністю.

Література

1. RECP Study Book 2017 / Resource Efficient and Cleaner Production Centre. Kyiv, 2017. 156 p. URL: <https://www.recpc.org/wp-content/uploads/2020/07/RECP-Study-Book-2017.pdf> (дата звернення: 01.10.2025).
2. Антропогенний вплив війни на водні ресурси: аналіз та потенційні шляхи відновлення/ І. Циганенко-Дзюбенко та ін. *Проблеми хімії та сталого розвитку*. 2024. Т. 3. с. 51–59. URL: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2024-3-7>
3. Пашков А. П. Екологічна оцінка стану поверхневих вод України та напрями їх відновлення. Київ, 2020. 45 с. URL: <https://ekmair.ukma.edu.ua/server/api/core/bitstreams/3960536b-e8fb-4670-bf7e-7c9a2d09e67d/content> (дата звернення: 01.10.2025).
4. Васенко О. Г., Черба О. В. Вплив бойових дій на довкілля України: хімічне забруднення. Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення: матеріали конференції. Харків, 2025. с. 45–52. URL: http://repositsc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/22291/1/konfer_2024.pdf (дата звернення: 01.10.2025).
5. Moreira F. D., Dias E. H. O. Constructed wetlands applied in rural sanitation: A review. *Environmental Research*. 2020. Vol. 191. 110016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110016>
6. Rosendo J. C. M., da Paz G. M., Rosendo A. Constructed wetlands applied on domestic wastewater for decentralized systems: concepts, processes, modalities, combinations and enhancements: a review. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*. 2022. Vol. 21. P. 371–397. DOI: <https://doi.org/10.1007/s1157-022-09616-1>
7. Звіт про науково-дослідну роботу № 21 / НДІЕП. Харків, 2021. 89 с. URL: <http://www.niiep.kharkov.ua/sites/default/files/NDR/2021/Zvit21.2021.pdf> (дата звернення: 01.10.2025).
8. Vymázač J. Historical development of constructed wetlands for wastewater treatment. *Land*. 2022. Vol. 11, No. 2. 174. DOI: <https://doi.org/10.3390/land11020174>
9. Vergeles Y., Vystavna Y., Ishchenko A., Rybalka I., Marchand L., Stolberg F. Assessment of treatment efficiency of constructed wetlands in East Ukraine. *Ecological Engineering*. 2015. Vol. 82. P. 151–159. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.06.020>
10. Vergeles Y. et al. Studying the properties of constructed wetland sediments for their possible application as fertilizers. In: Kalmar ECO-TECH '07: Proc. of Conf., 26–28 Nov. 2007. Kyiv: National Academy of Municipal Economy; University of Kalmar. DOI: <https://doi.org/10.15626/Eco-Tech.2007.015>
11. Вергелес Ю. І., Герасименко Я. О. Районування території України для впровадження фітотехнологій очищення стічних вод та захисту малих річок від забруднення. *Комунальне господарство міст*. 2017. Вип. 139. URL: <https://eprints.kname.edu.ua/48698/1/5124-10178-1-SM.pdf> (дата звернення: 01.10.2025).
12. Zhao X., Zhang T., Dang B., Guo M., Jin M., Li C., Hou N., Bai S. Microalgae based constructed wetland system enhances nitrogen removal and reduce carbon emissions: Performance and mechanisms. *Science of The Total Environment*. 2023. Vol. 877. 162883. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162883>
13. Saúco C., Cano R., Marín D., Lara E., Rogalla F. Hybrid wastewater treatment system based on a combination of high rate algae pond and vertical constructed wetland system at large scale. *Journal of Water Process Engineering*. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102311>
14. Garcia J., Ortiz A., Alvarez E., Belohlav V., Garcia-Galan M. J., Diez-Montero R., Alvarez J. A., Uggetti E. Nutrient removal from agricultural run-off in demonstrative full scale tubular photobioreactors for microalgae growth. *Algal Research*. 2018. Vol. 31. P. 363–374. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.algal.2018.01.023>
15. Dell'Osbel N., Colares G. S., Oliveira G. A. Hybrid constructed wetlands for the treatment of urban wastewaters: increased nutrient removal and landscape potential. *Ecological Engineering*. 2020. Vol. 158. 106072. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.106072>
16. Tanner C. C., Headley T. R. Components of floating emergent macrophyte treatment wetlands influencing removal of stormwater pollutants. *Ecological Engineering*. 2011. Vol. 37, No. 3. P. 474–486. URL: <https://hero.epa.gov/reference/2632558> (дата звернення: 01.10.2025).
17. Bista S., Karki B. K., Maharjan R. A review paper on Floating Treatment Wetlands: Working principles and applications for river water remediation. *Journal of Advanced College of Engineering and Management*. 2025. Vol. 10, No. 1. P. 13–30. DOI: <https://doi.org/10.3126/jacem.v10i1.76316>
18. Afzal M., Rehman K., Shabir G. Large-scale remediation of oil-contaminated water using floating treatment wetlands. *npj Clean Water*. 2019. Vol. 2. 3. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41545-018-0025-7>

Дата першого надходження рукопису до видання: 28.11.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 15.12.2025

Дата публікації: 31.12.2025