

С. М. Кватернюк¹
С. В. Мандебура²
Д. Р. Латуша¹
М. П. Максименко¹
В.О. Шевченко¹

ДЕКАРБОНІЗАЦІЯ ЗАБРУДНЕНОГО ПОВІТРЯ ТА ОЧИЩЕННЯ СТОКІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ШТУЧНИХ ВОДНО- БОЛОТНИХ УГІДЬ

¹Вінницький національний технічний університет

²Уманський державний педагогічний університет ім. Павла Тичини

Анотація

Глобальні виклики, пов'язані зі зміною клімату та дефіцитом чистих водних ресурсів, вимагають розробки інтегрованих та стійких технологічних рішень. Штучні водно-болотні угіддя (ШВБУ) визнані ефективною екологічно чистою технологією для очищення стічних вод. Проте їхня ефективність традиційно знижується у холодних кліматичних умовах через залежність біологічних процесів від температури. У цьому дослідженні представлено та проаналізовано інженерно оптимізований спосіб декарбонізації забрудненого повітря, поєднаний з біологічним очищенням стічних вод. Новизна підходу полягає у створенні багатфункціональної системи, яка вирішує проблему температурної залежності за рахунок активної терморегуляції через контрольований потік забрудненого повітря. Додатково впроваджено хімічну мінералізацію вуглекислого газу та проактивний біомоніторинг стану вищих водних рослин (ВВР) за допомогою мультиспектрального аналізу. Інтеграція цих компонентів перетворює ШВБУ з пасивного біофільтра на керовану платформу екологічної ремедіації з підвищеною стійкістю та можливостями рекуперації ресурсів, зокрема, виробництва відновлюваного палива з вилученої біомаси.

Ключові слова: штучні водно-болотні угіддя, декарбонізація, очищення стічних вод, вищі водні рослини, парникові гази.

Abstract

Global challenges related to climate change and the scarcity of clean water resources require the development of integrated and sustainable technological solutions. Constructed wetlands (CW) are recognized as an effective environmentally friendly technology for wastewater treatment. However, their effectiveness is traditionally reduced in cold climatic conditions due to the dependence of biological processes on temperature. This study presents and analyzes an engineering-optimized method of decarbonization of polluted air, combined with biological wastewater treatment. The novelty of the approach lies in the creation of a multifunctional system that solves the problem of temperature dependence due to active thermoregulation through a controlled flow of polluted air. Additionally, chemical mineralization of carbon dioxide and proactive biomonitoring of the state of higher aquatic plants (HAP) using multispectral analysis were introduced. The integration of these components transforms the SHVBU from a passive biofilter into a managed environmental remediation platform with increased sustainability and resource recovery capabilities, in particular, the production of renewable fuels from recovered biomass.

Keywords: artificial wetlands, decarbonization, wastewater treatment, higher aquatic plants, greenhouse gases.

Вступ

Сучасна цивілізація стикається з подвійним екологічним навантаженням: зростанням викидів парникових газів (ПГ), які спричиняють глобальне потепління, та необхідністю ефективної обробки зростаючих обсягів стічних вод. Водно-болотні угіддя відіграють ключову роль у боротьбі зі зміною клімату, оскільки, покриваючи лише близько 1% поверхні Землі, вони здатні зберігати понад 20% усього вуглецю, поглиненого екосистемами в усьому світі. Дослідження підтверджують, що штучно створені водно-болотні системи також мають потенціал функціонувати як значні вуглецеві поглиначі порівняно з традиційними методами очищення стічних вод. ВВР у ШВБУ фіксують атмосферний CO₂ у біомасі, а органічний вуглець накопичується в донних відкладеннях.

ШВБУ застосовуються для видалення органічних речовин, поживних речовин (азоту та фосфору) та важких металів завдяки синергетичній дії фізичних, хімічних та біологічних процесів. Ця технологія є привабливою завдяки високій ефективності, низькій вартості експлуатації та екологічній безпечності.

Незважаючи на значні переваги, широке застосування ШВБУ обмежене їхньою чутливістю до зовнішніх факторів. Зокрема, ефективність очищення ґрунтується на біологічних процесах, які значно сповільнюються при зниженні температури нижче оптимального діапазону. Крім того, традиційні ШВБУ (особливо поверхневого потоку) можуть бути джерелами метану (CH_4), який має значно вищий потенціал глобального потепління (GWP) порівняно з CO_2 .

Запропонований підхід [1] має на меті розширити функціональні можливості ШВБУ, інтегрувавши процес декарбонізації повітря та забезпечивши стабільність біологічних процесів незалежно від кліматичних коливань. Це досягається шляхом запровадження проактивних інженерних операцій:

- попереднє очищення повітря скруббером для захисту біосистеми від твердих небіорозкладних частинок;
- активна терморегуляція за допомогою керованого потоку забрудненого повітря;
- фіксація CO_2 через хімічну мінералізацію у стічних водах;
- постійний біомоніторинг стану ВВР через мультиспектральний аналіз.

Ця інтеграція перетворює систему на платформу точного екологічного інжинірингу, де екосистема управляється за допомогою параметрів (температура, потік газу, біоіндикатори) для забезпечення максимальної продуктивності.

Результати дослідження

Процес декарбонізації розпочинається з подачі попередньо очищеного повітря у ємність зі стічними водами. Забруднене повітря очищується скруббером від твердих частинок, які не піддаються біорозкладанню, що є критичним кроком для захисту та довговічності подальшої біологічної системи. Потім очищене повітря подається через розпилювач у товщу стічних вод, забезпечуючи інтенсивний контакт "газ-рідина". Поглинання CO_2 відбувається у водному середовищі. Швидкість абсорбції CO_2 у водних розчинах значною мірою залежить від кінетики реакції CO_2 з гідроксильними іонами.

У системі, де стічні води містять гідрокарбонатні іони та іони кальцію (типові для жорстких вод), відбувається хімічна мінералізація вуглекислого газу. CO_2 взаємодіє з водою, утворюючи вугільну кислоту, яка, у свою чергу, реагує з гідрокарбонатом кальцію ($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$), що призводить до утворення нерозчинного осаду карбонату кальцію (CaCO_3).

Цей процес забезпечує подвійну перевагу: фіксацію вуглецю в стабільній формі (твердий карбонатний осад) та пом'якшення води. Утворений осад може бути видалений, а пом'якшена вода ефективніше використовується для подальших біологічних процесів.

Біологічне очищення є основним механізмом у ШВБУ. Очищення стічних вод відбувається в аеробних умовах за допомогою мікроорганізмів, які іммобілізовані на кореневій системі вищих водних рослин.

Ризосфера ВВР, таких як очерет (*Phragmites australis*), є ключовим біореактором. Рослини забезпечують транспортування кисню до кореневої зони, створюючи аеробні умови, необхідні для окислення органічних забруднювачів та нітрифікації. Крім того, ВВР виділяють кореневі екsudати — органічний вуглець, який слугує джерелом енергії для мікроорганізмів, посилюючи біорозкладання органічних речовин (загальних зважених речовин (TSS), біохімічного споживання кисню (БСК₅) та хімічного споживання кисню (ХСК).

Пристрій, що реалізує спосіб комплексної ремедіації, є гібридною інженерною системою. Центральним елементом є ємність, заповнена стічними водами, де розміщений шар вищих водних рослин, закріплений до несучого елементу з перфорованим дном. Система управління включає: комп'ютер та мікроконтролерний пристрій, що керують процесами; датчик температури; скруббер, який отримує забруднене повітря через трубопровід і видаляє тверді небіорозкладні частки; регулятор швидкості потоку, який контролюється комп'ютером і дозує подачу очищеного повітря через розпилювач у ємність.

Однією з ключових інновацій цього способу є активне управління температурою стічних вод. Біологічні процеси, що забезпечують очищення, залежать від життєдіяльності мікроорганізмів, які є найбільш активними в мезофільному діапазоні, зазвичай від 20 до 40°C. В умовах холодного клімату або взимку ефективність видалення поживних речовин (зокрема, азоту) у традиційних ШВБУ значно знижується. Запропонований метод вирішує цю проблему за рахунок використання забрудненого повітря як носія теплової енергії та інструмента регуляції теплообміну. Комп'ютер безперервно вимірює температуру стічних вод за допомогою датчика. Якщо температура води падає нижче діапазону, сприятливого для ВВР та мікроорганізмів, комп'ютер регулює швидкість потоку забрудненого повітря.

Барботування газу через рідину у ємності – процес, типовий для бульбашкових колон – забезпечує ефективний теплообмін "газ-рідина". Швидкість потоку газу є ключовим параметром, що контролює інтенсивність цього теплообміну: чим вища швидкість потоку, тим інтенсивніший теплообмін та перемішування. Активне регулювання теплового навантаження дозволяє підтримувати оптимальний температурний режим, тим самим розширюючи географічні та сезонні межі застосування ШВБУ. Цей механізм перетворює систему з кліматично залежного фільтра на інженерно контрольований біореактор.

Для забезпечення постійної високої ефективності біологічного очищення та раннього виявлення стресу ВВР використовується інструментальна система біомоніторингу. Ця система ґрунтується на формуванні мультиспектральних зображень ВВР [2]. Принцип діагностики полягає в опосередкованому вимірюванні співвідношення між каротиноїдами та загальним хлорофілом. Хлорофіли мають піки поглинання у синій (близько 430-470 нм) та червоній (близько 640-660 нм) ділянках спектра, тоді як каротиноїди мають широкий діапазон поглинання у синій області (400–500 нм), що частково перекривається зі спектром хлорофілу. Спектральні індекси, що використовують ці смуги, є надійним інструментом для оцінки фізіологічного стану рослин. Підвищення співвідношення каротиноїдів до хлорофілу є чітким біоіндикатором фізіологічного стресу (наприклад, надлишкове забруднення, дефіцит поживних речовин або температурний шок), оскільки каротиноїди відіграють захисну роль, запобігаючи пошкодженню фотосинтетичного апарату. Комп'ютер аналізує ці дані, і якщо співвідношення відхиляється більш ніж на вибране порогове значення (наприклад, 30%), система ініціює заміну шару ВВР на нові рослини на стадії вегетативного росту. Така проактивна діагностика дозволяє уникнути зниження ефективності очищення, пов'язаного зі старінням або пошкодженням біомаси.

Інтегрований підхід забезпечує високу ефективність очищення завдяки послідовному застосуванню кількох бар'єрів. Попередня очистка повітря скруббером захищає біологічну систему від небіорозкладних твердих частинок. Подальша примусова аерація виконує кілька функцій одночасно: забезпечує киснем мікроорганізми для аеробного розкладання органіки, підтримує оптимальну температуру і забезпечує необхідний контакт CO_2 зі стічними водами для мінералізації. Перевага аеробного режиму, підтримуваного примусовою аерацією, полягає у підвищеній швидкості біорозкладання органічних забруднювачів. Зокрема, підповерхневі системи (HSSF) ефективно зменшують БСК5 та ХСК на 79.2% та 72.1% відповідно. Крім того, аерація сприяє нітрифікації, що є важливим для видалення амонійного азоту (NH_4), оскільки традиційні HSSF ШВБУ зазвичай мають низьку здатність до нітрифікації через анокисні/анаеробні умови. Дослідження показують, що підповерхневі системи демонструють значно вищі показники видалення NH_4 порівняно з системами поверхневого потоку.

Важливим аспектом оцінки екологічної стійкості ШВБУ є їхній вплив на баланс парникових газів (ПГ), зокрема CH_4 та N_2O , які мають значно вищий GWP, ніж CO_2 . Хоча ШВБУ є чистими поглиначами CO_2 завдяки фотосинтезу, викиди метану можуть нівелювати цей ефект. GWP метану у 34 рази перевищує GWP вуглекислого газу.

У традиційних ШВБУ поверхневого потоку (FWS) та HSSF-системах, де присутні анаеробні зони, можуть спостерігатися значні викиди метану. Однак примусова аерація, впроваджена в інтегрованій системі, є критичним механізмом для зменшення анаеробних умов, що призводить до значного зниження потоків CH_4 . Насичення води киснем сприяє окисненню метану до CO_2 . Хоча це призводить до збільшення загальних викидів CO_2 , загальний екологічний вигравш від пригнічення CH_4 є позитивним, забезпечуючи найнижчий загальний GWP серед порівнюваних систем.

Таким чином, технологічна оптимізація інтегрованого комплексу спрямована не лише на уловлювання CO_2 , але й на боротьбу з високопотенційними парниковими газами, що робить його ефективним інструментом пом'якшення наслідків зміни клімату.

Концепція сталого розвитку вимагає, щоб технології очищення відходів були інтегровані в модель циркулярної економіки. У запропонованому способі вилучена біомаса вищих водних рослин, яка забруднена стічними водами, не підлягає простому захороненню. Замість цього, вона підсушується, брикетується та використовується як відновлюване паливо у котлах котельень. Використання ВВР, зокрема очерету (*Phragmites australis*), забезпечує значний потенціал енергетичної рекуперації. *Phragmites australis* є високопродуктивною культурою, здатна давати річний вихід біомаси до 105 тонн на гектар у оптимальних кліматичних умовах. Висушена біомаса має високу теплотворну здатність. Порівняння теплотворної здатності біомаси ВВР та традиційного палива демонструє її економічну життєздатність.

Застосування комп'ютерного керування забезпечує динамічну оптимізацію роботи системи. Мультиспектральний моніторинг стану рослин дозволяє оперативно діагностувати фізіологічний стрес. Якщо співвідношення каротиноїдів/хлорофілу вказує на погіршення стану ВВР, комп'ютер може не

лише ініціювати фізичну заміну біомаси, але й скоригувати інженерні параметри. Наприклад, якщо діагностовано біологічний стрес, спричинений надлишком забруднюючих речовин, або зміною температури, комп'ютер може змінити швидкість потоку повітря. Регулювання потоку повітря впливає на два ключові параметри: тепловий баланс та рівень кисню (аерацію). Підтримання оптимальних умов за температурою та рівнями забруднюючих речовин є критичним для життєдіяльності ВВР та мікроорганізмів у їхній кореневій системі. Це демонструє перехід від простого моніторингу до інтелектуального управління екосистемою, де комп'ютерний контроль забезпечує постійну високу продуктивність. Крім того, подача CO₂ у воду може мати позитивний зворотний зв'язок: підвищена концентрація CO₂ стимулює чисту швидкість фотосинтезу та загальний ріст біомаси ВВР. Таким чином, CO₂, уловлений з повітря, служить не лише для мінералізації, але й як додаткове джерело вуглецю, що сприяє збільшенню продуктивності біореактора.

Висновки

Інтегрований спосіб декарбонізації забрудненого повітря та очищення стічних вод, що ґрунтується на використанні оптимізованих штучних водно-болотних угідь, є високотехнологічною та екологічно стійкою інженерною розробкою. Спосіб успішно поєднує три функціональні процеси: попереднє очищення повітря скруббером, хімічну мінералізацію CO₂ у стічних водах та біологічне очищення в аеробних умовах. Впровадження активного контролю температури стічних вод за допомогою регульованого потоку повітря (барботування) усуває критичний недолік сезонної чутливості ШВБУ. Це дозволяє підтримувати оптимальні мезофільні умови для мікроорганізмів, забезпечуючи стабільно високу ефективність очищення незалежно від зовнішніх кліматичних умов. Примусова аерація має вирішальне значення для зниження загального потенціалу глобального потепління системи. Забезпечуючи аеробні умови, вона ефективно пригнічує утворення та викиди метану CH₄, який має значно вищий GWP, ніж CO₂. Технологія підтримує модель циркулярної економіки шляхом використання вилученої біомаси ВВР як відновлюваного палива (брикетування), забезпечуючи енергетичну рекуперацію та підвищуючи економічну життєздатність комплексу. Система моніторингу стану рослин за допомогою мультиспектрального аналізу співвідношення каротиноїдів до хлорофілу дозволяє здійснювати проактивну діагностику стресу та коригувати інженерні параметри (наприклад, швидкість подачі повітря), оптимізуючи функціонування біореактора. Для повного впровадження та комерціалізації інтегрованої технології необхідні подальші дослідження, спрямовані на деталізацію та масштабування процесів. Необхідно провести великомасштабні пілотні дослідження для підтвердження довгострокової ефективності видалення всіх груп забруднюючих речовин та динаміки парникових газів у польових умовах, оскільки більшість існуючих даних базується на пілотних дослідженнях. Потрібна розробка точних математичних моделей теплообміну "газ-рідина" у системі барботування для забезпечення точного прогнозування необхідної швидкості потоку повітря, що підтримує оптимальну температуру в залежності від зовнішніх кліматичних факторів та об'єму стічних вод. Подальше вивчення оптимальних мультиспектральних індексів та довжин хвиль, специфічних для різних видів ВВР та типів забруднюючих речовин, для підвищення чутливості та точності діагностики фізіологічного стресу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Петрук В.Г., Кватернюк С.М., Кватернюк О.Є., Мандебура С.В., Гончарук В.С., Латуша Д.Р., Максименко М.П. Спосіб декарбонізації забрудненого повітря з використанням штучних водно-болотних угідь: пат. 160767 Україна. № u202500115; заявл. 10.01.2025; опубл. 09.10.2025, Бюл. № 41/2025.
2. Кватернюк С. М., Петрук В. Г. Мультиспектральні методи та засоби комп'ютеризованого екологічного моніторингу водних об'єктів : монографія [Електронний ресурс]. Вінниця : ВНТУ, 2023. 314 с. – 8,4 Мб. ISBN 978-966-641-930-2. (PDF) <https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/book/774>.

Кватернюк Сергій Михайлович – д.т.н., професор, професор кафедри екології, хімії та технологій захисту довкілля, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: serg.kvaternuk@gmail.com.

Мандебура Святослав Васильович – викладач кафедри хімії, екології та методики їх навчання Уманського державного педагогічного університету ім. Павла Тичини, м. Умань, e-mail: eko14b.mandebura@gmail.com.

Латуша Дмитро Русланович – аспірант кафедри екології, хімії та технологій захисту довкілля, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: dima.latusha27@gmail.com.

Максименко Максим Павлович – аспірант кафедри екології, хімії та технологій захисту довкілля, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: obzzorator@gmail.com.

Шевченко Валентин Олександрович – аспірант кафедри екології, хімії та технологій захисту довкілля, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: raptor.sad77@gmail.com.

Serhii M. Kvaterniuk – Dr. Sc. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Ecology, Chemistry and Environmental Protection Technologies, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: serg.kvaternuk@gmail.com.

Sviatoslav V. Mandebura – Lecturer of the Department of Chemistry, Ecology and Methods of their teaching, Pavlo Tychyna Uman State Pedagogical University, Uman, e-mail: eko14b.mandebura@gmail.com.

Dmytro R. Latusha – Postgraduate of the Department of Ecology, Chemistry and Environmental Protection Technologies, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: dima.latusha27@gmail.com.

Maxim P. Maksimenko – Postgraduate of the Department of Ecology, Chemistry and Environmental Protection Technologies, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: obzzorator@gmail.com.

Valentyn O. Shevchenko – Postgraduate of the Department of Ecology, Chemistry and Environmental Protection Technologies, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: raptor.sad77@gmail.com.