

ОГЛЯДИ

УДК 628.35:620.92:504.064

doi: 10.25128/2078-2357.25.4.10

Л. Р. ГРИЦАК^{ID}, Х. М. КОЛІСНИК^{ID}, Н. М. ДРОБИК^{ID}

Тернопільський національний педагогічний університет імені Володимира Гнатюка
вул. М. Кривоноса, 2, Тернопіль, 46027
E-mail: hrytsak1972@gmail.com

ГЕНЕРАЦІЯ НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВОЇ ЕНЕРГІЇ В СИСТЕМАХ БІОЛОГІЧНОГО ОЧИЩЕННЯ СТІЧНИХ ВОД

У статті розглянуто підходи до трансформації енергозалежних технологій очищення стічних вод у межах водно-енергетичного нексусу. Проаналізовано взаємозв'язок водного сектору з енергоспоживанням і залежність очисних споруд від викопних джерел енергії, що супроводжується викидами CO₂. Висвітлено зростання обсягів стічних вод та екологічні ризики їх недостатнього очищення, зокрема погіршення якості вод, деградацію екосистем, забруднення ґрунтів і біокумуляцію токсичних речовин.

Висвітлено енергетичний потенціал стічних вод і ефективність технологій рекуперації енергії. Проаналізовано інноваційні рішення (мембранні й анаеробні біореактори, штучні водно-болотні угіддя, мікробні паливні елементи) та їх можливості інтеграції.

Зазначено, що анаеробні процеси забезпечують утворення біогазу, а біоелектрохімічні системи – вироблення електроенергії. Обґрунтовано перехід до енергоефективних і енергопозитивних систем. Узагальнено, що циркулярне управління ресурсами є ключовим для сталого розвитку та кліматичної нейтральності.

Ключові слова: екологічна безпека, водно-енергетичний нексус, стічні води, енергоефективність, мембранні біореактори, анаеробні процеси, мікробні паливні елементи, секвестрація вуглецю.

Технології, які пов'язують водний та енергетичний сектори, отримали назву «Водно-енергетичний нексус». Використання енергії у водному секторі значною мірою залежить від викопних джерел. Так само це збільшує викиди вуглекислого газу (CO₂). На водний сектор припадає 4 % від загального споживання енергії, а на очисні споруди з високим рівнем енергоспоживання (ОСВ) – 25 % [13]. У світі щорічно утворюється майже 400 мільярдів м³ стічних вод і очікується, що цей показник зросте на 25 % і 50 % до 2030 та 2050 років відповідно. Характеристики стічних вод безпосередньо залежать від джерела походження. Основними з-поміж них є атмосферні, промислові та побутові стічні води [1]. Недостатньо очищені стічні води погіршують якість поверхневих і ґрунтових вод, а також впливають на фізико-хімічні властивості ґрунту, забруднюючи їх токсичними вуглеводнями, важкими металами. Це призводить до деградації водного середовища існування, біокумуляції забруднювачів у харчових ланцюгах, погіршення структури ґрунту та в довгостроковій перспективі – до екологічного дисбалансу.



©2025 Л. Р. Грицак та співавт. Стаття відкрита для доступу та розповсюджується на умовах ліцензії [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), яка дозволяє необмежене використання, розповсюдження та відтворення на будь-якому носії за умови належного цитування оригінальної роботи.

У процесі очищення стічних вод відбувається не лише утворення осаду, але й споживається значна кількість енергії та виділяється CO_2 . Це потребує перегляду та модернізації очисних технологій та ефективнішого контролю викидів вуглецю. Приблизно 80 % муніципальних стічних вод у розвинених країнах очищається за допомогою аеробного процесу, відомого як процес активного мулу, для видалення органічних вуглецевих та азотних сполук [15]. Аерація забезпечує більшу частину (>60 %) енергії, необхідної для очищення, що залежить від характеристик стічних вод, схеми очищення та потужності споруди, при цьому середня електроємність становить 0,13–0,79 кВт·год на м^3 очищених стічних вод. Споживання енергії для очищення стічних вод також залежить від конфігурації технологій та фізико-географічних умов. Наприклад, середнє споживання енергії для очисних споруд активного мулу в Європі становить від 0,15 до 0,7 кВт·год/ м^3 . Середні значення питомого споживання енергії в деяких розвинених країнах, таких як Німеччина, Італія, Нідерланди, Велика Британія та Сполучені Штати, становлять 0,67, 0,55, 0,47, 0,64 та 0,45 кВт·год/ м^3 відповідно, на що впливають різні вищезгадані фактори [3, 5, 16].

Зазначають, що стічні води містять приблизно в п'ять разів більше енергії, ніж потрібно для їх очищення: ~80 % прихованої енергії у стічних водах є тепловою, ~20 % – хімічною, а <1 % потенціалу існує у гідравлічному виробництві [13]. Розуміння доступної енергії у стічних водах є критично важливим кроком до розробки схем рекуперації енергії та ресурсів на очисних спорудах. Завдяки передовим технологіям, вони можуть стати чистими виробниками енергії та, можливо, вважатися вуглецево-негативними об'єктами. Процес анаеробного розкладання генерує біогаз (CH_4), який можна використовувати для компенсації частини (25–50 %) енергетичних потреб у процесі активного мулу, а інші модифікації установки також можуть значно зменшити енергетичні потреби [4]. Однак, якщо більше енергії, що міститься у стічних водах, буде використано для подальшого застосування, а ще менше – для очищення стічних вод, то очисні споруди можуть стати чистими виробниками енергії, а не споживачами.

Метою наших досліджень є аналіз розробок, які перетворюють енергозалежні технології очищення стічних вод на енергоефективні або енергопозитивні.

Типові процеси очищення стічних вод включають просіювання, видалення піску, первинне відстоювання, аерацію (або використання активного мулу), вторинне відстоювання, фільтрацію, дезінфекцію та обробку осаду. Усі ці етапи зазвичай є енергозалежними та вуглецевомісткими. Проте декілька технологій вилучення енергії можна адаптувати до очисних споруд. Перехід до сталого очищення стічних вод здійснюється завдяки передовим технологіям, таким як мембранні біореактори (МБР), анаеробні біореактори, штучні водно-болотні угіддя (ШВ) та мікробні паливні елементи (МПЕ), які підтримують системи рекуперації енергії, одночасно зменшуючи кількість відходів.

Мембранні біореактори – це передова технологія очищення води, яка поєднує біологічну обробку з мембранною фільтрацією для отримання високоякісних стічних вод [6]. МБР інтегрує технології використання активного мулу з мембранною фільтрацією, зазвичай використовуючи мікрофільтраційні або ультрафільтраційні мембрани для досягнення кращого видалення забруднюючих речовин, порівнюючи з традиційними методами [10]. У системі МБР початковий етап включає біологічну обробку стічних вод в аеротенку, де мікроорганізми розкладають органічні забруднювачі. Згодом об'єднаний розчин проходить через мембранний модуль, який ефективно відокремлює очищену воду від біомаси та інших твердих частинок [7]. Процес мембранної фільтрації ефективно видаляє частинки, бактерії та залишки органічних речовин, створюючи прозорий пермеат високої якості [17]. МБР має численні переваги, як порівняти з традиційними методами очищення. Вони досягають вищої якості стічних вод, підтримуючи низький рівень зважених частинок, патогенів та органічних забруднювачів, що робить їх придатними для скидання в екологічно чутливих районах або повторного використання води [18]. Системи МБР характеризуються компактністю конструкції, що забезпечує зменшення площі, необхідної для їх розміщення, та дозволяє ефективно очищувати значні обсяги стічних вод зі стабільними показниками ефективності. Крім того, зменшення потреби у вторинних відстійниках та менше утворення осаду спрощує експлуатацію та технічне обслуговування установок [14]. Однак, системи МБР, як правило, спричиняють вищі витрати. Це пов'язано з мембранами та більшими потребами в технічному обслуговуванні та очищенні.

Однак, досягнення в мембранних технологіях та проектуванні систем постійно підвищують їхню ефективність та знижують витрати, що робить МБР корисним активом у передових системах очищення води.

МБР ефективно утримує біомасу завдяки поєднанню біологічної обробки та мембранної фільтрації. Мікробні угруповання розвиваються ефективніше за тривалого часу утримання завдяки МБР, що дозволяє їм розщеплювати складні та стійкі органічні молекули. МРБ демонструють кращі результати видалення забруднюючих речовин, ніж типові системи активного мулу, завдяки біологічній обробці в поєднанні з мембранною фільтрацією, що забезпечує краще утримання біомаси шляхом подовження часу утримання мулу [14]. Досліджено, що чим тоншими є мембрани, тим ефективніше вони працюють. Атомарно тонкі мембрани зберігають свою структурну цілісність і за такої умови забезпечують мінімальний опір іонам. Активне використання мембран для вилучення енергії сприяє еволюції мембранних технологій.

Анаеробні біореактори. Анаеробне перероблення (АП) давно використовували на очисних спорудах для стабілізації осаду з одночасним виробництвом біогазу. У процесі спільного перероблення осаду з субстратами із високим вмістом органічних речовин, включаючи сільськогосподарські та харчові відходи, жири, олію та мастила, отримують значну частку електроенергії [3]. Наприклад, очисна споруда в Берні (Швейцарія) у процесі спільного перероблення осаду із рослинними та харчовими відходами виробляє вдвічі більше енергії, ніж споживає споруда [5]. Розроблено анаеробний біореактор, компактний мембранний блок якого забезпечує кращу якість стічних вод, низьке утворення осаду та виробляє значну кількість біогазу. Анаеробні динамічні мембранні біореактори можуть працювати за кімнатної температури та виробляти чисту енергію $0,05\text{--}0,06 \text{ кВт}\cdot\text{м}^{-3}$ [2]. Вони дозволяють отримувати біогаз навіть за використання низькоконцентрованих стічних вод. Продуктивність таких реакторів об'ємом 5 м^3 становить $0,09\text{--}0,10 \text{ л}$ біогазу на 1 літр неочищених стічних вод за температури 25°C . Вміст метану в такому біогазі коливається у діапазоні $75\text{--}81 \%$ [8].

Технології, пов'язані з анаеробним біореактором, – це приклад моделей циркулярної економіки, оскільки використання стічних вод дозволяє покривати енергетичні потреби комунальних підприємств та громад і сприяє ефективній експлуатації ресурсів. Ці технології активно впроваджують у біоенергетиці, однак більшість сучасних анаеробних біореакторів все ще потребують удосконалення своїх конструкцій та умов застосування.

Штучні водно-болотні угіддя – це технологія очищення стічних вод, запозичена з природи, яка відтворює водно-болотні екосистеми для очищення стічних вод. З невеликими витратами енергії ці системи видаляють забруднюючі речовини за допомогою поглинання рослинами мікробного розщеплення та фільтрації ґрунту [11]. Зі споживанням енергії менше ніж $0,1 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^3$, гібридні ШВ (поєднують вертикальний та горизонтальний потік) продемонстрували ефективність видалення забруднюючих речовин $80\text{--}90 \%$ для БСК та $60\text{--}80 \%$ для поживних речовин. У ШВ біомаса збільшується завдяки щільному росту водних та напівводних рослин, які поглинають атмосферний CO_2 під час фотосинтезу та зберігають його у вигляді рослинної тканини. Після розкладу частина цієї органічної речовини включається до ґрунту водно-болотних угідь, забезпечуючи виведення вуглецю із системи на тривалий час. Цей механізм дозволяє ШВ ефективно захоплювати та поєднувати вуглець. Очікуваний потенціал процесу коливається від $0,1$ до $0,3 \text{ кг CO}_2 \text{ е}/\text{м}^3$ [9].

Паливні елементи – це інноваційні біоелектрохімічні системи, які використовують живі мікроорганізми, зокрема електрогенні бактерії, для прямого перетворення хімічної енергії біорозкладних органічних речовин на електричну енергію. Вони здобули популярність для виробництва електроенергії, водню та цінних хімічних речовин. Функціонально такі системи є протилежністю електролізної комірки. Вони є пристроєм, який може перетворювати хімічну енергію на електричну. Зазвичай він складається з анода та катода, які з'єднані через зовнішнє коло та хімічне паливо. Ці системи працюють так, що мікроорганізми розкладають органічні відходи в камері (анод), виробляючи електрони та протони як побічні продукти свого метаболізму. Електрони проходять через зовнішній ланцюг, щоб досягти катода, створюючи електричний струм, тоді як протони проходять через мембрану протонного обміну, щоб з'єднатися з киснем на катоді, утворюючи воду. Вперше мікробні паливні елементи (МПЕ)

були представлені в 1911 році М. К. Поттером [13]. На цей час використовують низку мікроорганізмів (наприклад, *Clostridium cellulolyticum*, *Enterobacter cloacae* та *Clostridium butyricum*), а також грибів (наприклад, *Aspergillus awamori* та *Phanerochaete chrysosporium*), які працюють як біокатализатори для зниження перенапруги активації певного окисно-відновного процесу, підвищуючи її ефективність та швидкість виробництва.

МПЕ мають численні переваги для відновлення енергії та секвестрації вуглецю. Вони ефективно перетворюють органічні відходи, такі як стічні води або сільськогосподарські відходи, на екологічно чисту електроенергію, зменшуючи залежність від викопного палива. Ця процедура допомагає зменшити викиди парникових газів, уникаючи виділення метану з необроблених органічних відходів. Крім того, МПЕ може допомогти у секвестрації вуглецю, перетворюючи органічний вуглець у більш стабільні форми, ефективно зменшуючи кількість CO_2 в атмосфері [11].

Мікробні системи включають мікробні паливні елементи (МПЕ, як показано на рис. 1a), мікробні опріснювальні елементи (МПК, на рис. 1b) та рослинний мікробний електролізні елементи (МЕК, на рис. 1c).

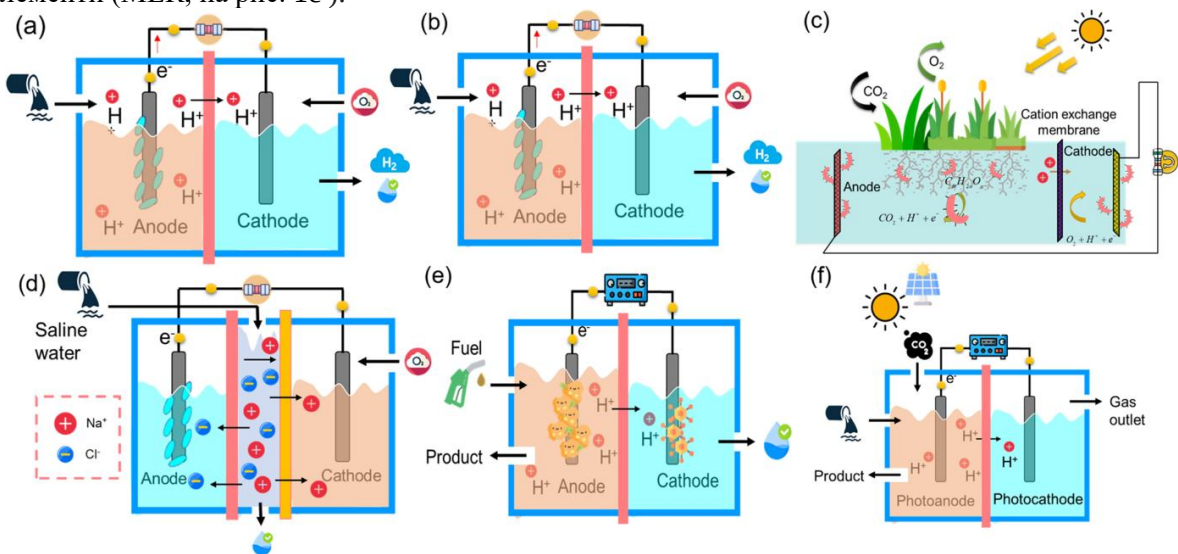


Рис. 1. Типові схематичні зображення паливних елементів [13].

Примітки: а – мікробний паливний елемент; б – мікробний електролізний елемент; с – рослинний мікробний паливний елемент або мікробний сонячний елемент; д – мікробний опріснювальний елемент; е – ферментативний паливний елемент; ф – фотокаталітичний паливний елемент.

Фактично, окремий блок МПЕ пропонує відносно низьку щільність енергії. На практиці, здійснюють з'єднань кількох МПЕ для збільшення вихідної потужності. МПК є дешевшою альтернативою, яка могла б підтримувати технології опріснення (зворотний осмос, електродіаліз та ємнісна деіонізація), які можуть опріснювати та очищувати (стічні) води, а також виробляти електроенергію за допомогою бактерій (екзоелектрогенів). Він має три камери, тобто анодну, опріснювальну та катодну, і використовується в лабораторних масштабах. Наприклад, гідравлічно з'єднаний МПК генерував щільність потужності $0,86 \text{ Вт м}^{-2}$ [12], двокамерний МПК [13] виробляє $2,0 \text{ Вт м}^{-2}$. Окрім виробництва електроенергії, МПК мають інші переваги, а саме: $>90\%$ видаляють нітратів, $>80\%$ видаляють важких металів та карбонату кальцію, 80% – аміаку, а також виробляють H_2 . МЕК здатний видаляти органічні речовини та одночасно генерувати H_2 . Мікроорганізми використовуються як біокатализатори для зниження перенапруги активації певного окисно-відновного процесу та для підвищення ефективності напруги та швидкості виробництва. Ферментативний паливний елемент (ФПЕ, як показано на рис. 1e) – це відновлюване та екологічно чисте джерело енергії. Ферменти діють як каталізатор, що перетворює вивільнену хімічну енергію (у результаті ферментативного окислення таких видів палива, як водень, спирти та цукри) на електричну енергію. Це

здійснюється у процесі транспорту електронів, що вивільняються в результаті хімічної реакції. ФПЕ, що працюють на стічних водах та використовують водень, отриманий з МЕК, можуть зменшити викиди приблизно на $9,3 \text{ кг CO}_2^{\text{екв}}$ на кг H_2 , отриманого за допомогою традиційної технології парового риформінгу метану для виробництва H_2 [13]. Фотокаталітичний паливний елемент (ФКЕ, синергетична інтеграція фотокаталізу та паливного елемента, як показано на рис. 1f) може розкласти органічні забруднювачі, присутні у стічних водах, та відновлювати хімічну енергію. Основні компоненти ФКЕ включають джерело світла, катод, фотоанод та органічні стічні води як хімічне паливо.

Паливні елементи функціонують подібно до акумуляторів і пропонують низку переваг, порівнюючи з технологіями на основі викопного палива. Мікробні та ферментативні системи є біоелектрохімічними розчинами. Застосування паливних елементів дозволяє мінімізувати вартість, підвищити продуктивність та довговічність, вдосконалити конструкції мембран і модулів.

Рівень готовності вище описаних технологій (ТРГ, за шкалою від 1 до 9: 1 – найнижчий, а 9 – найвищий) є показником зрілості конкретної з них та відображає впровадження реальної системи в робочому середовищі. Для анаеробних біореакторів АП вважається найзрілішою та широко застосовуваною технологією з ТРГ 9. АП використовуються як на невеликих, ізольованих об'єктах, так і найбільших у світі очисних спорудах. МБР все ще перебувають на рівні ТРГ 4 і можуть зрости до ТЗГ 6 до 2027 року. Для МПЕ загальний рівень ТРГ становить 3–4, оскільки існує потреба у збільшенні електричної потужності завдяки механізмам, що забезпечують перенесення позаклітинних електронів; використання економічно ефективних катодів; оптимізації конструкції для ефективної роботи та розширення технологій на інші складні субстрати зі специфічними бактеріями для забезпечення масштабнішого застосування. Однак очікується, що до 2035 року ТРГ для МПЕ досягне показника 6. Більшість інших технологій виробництва енергії перебувають на початковій стадії розвитку та потребують подальшого вдосконалення, щоб подолати свої недоліки або обмеження та покращити свої ТРГ.

Все більше країн долучаються до перегонів за досягнення нульових викидів. До 2021 року організація «Global Water Intelligence» виявила 65 водоканалів та очисних споруд, які зобов'язалися досягти цілей нульового рівня викидів або кліматичної нейтральності; 26 з них приєдналися до глобальної кампанії «Перегони до нульового рівня» Рамкової конвенції Організації Об'єднаних Націй про зміну клімату, щоб продемонструвати свою відданість та результати в усьому світі. За даними Агентства з охорони навколишнього середовища США (USEPA), на кожному етапі циклу водокористування існують можливості для енергоефективності, відновлюваної енергії та водоефективності. USEPA запропонувала семиетапний процес у документі «Забезпечення сталого майбутнього: Посібник з управління енергією для водоканалів та водовідведення» [13], заснований на циклічному еволюційному підході до систем управління «Плануйте-Виконуйте-Перевіряйте-Дійте», описаному в Керівних принципах ENERGY STAR® щодо управління енергією. Для досягнення нульових викидів вуглецю до 2050 року суспільству потрібні скоординовані інвестиції в дослідження, обмін передовим досвідом та спільне впровадження [13]. Сектори водопостачання з нульовим рівнем викидів також можуть сприяти досягненню кількох Цілей сталого розвитку та якості життя для всіх людей.

Висновки

Отже, енергоємні та вуглецевомісткі очисні споруди стічних вод можуть стати значними виробниками енергії та генераторами перероблених органічних і металевих матеріалів, тим самим сприяючи досягненню широких цілей сталого розвитку, циркулярної економіки та зв'язку між водою, енергією, санітарією, харчуванням та вуглецем. Розвинені країни з високим вуглецевим слідом вже почали рухатися до низьковуглецевої економіки. Наприклад, >50 % нових потужностей, доданих до мережі в США, є безвуглецевими, і очікується, що до 2035 року вони перейдуть на 90 % безвуглецевої енергії.

1. Alqahtani H. S. Lower-Carbon Hydrogen Production from Wastewater: A Comprehensive Review. *Sustainability*. 2024. Vol. 16, № 19. P. 8659. <https://doi.org/10.3390/su16198659>.
2. Aslam M., McCarty P. L., Shin C., Bae J., Kim J. Low energy single-staged anaerobic fluidized bed ceramic membrane bioreactor (AFCMBR) for wastewater treatment. *Bioresour. Technol.* 2017. Vol. 240. P. 33–41. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.03.017>.
3. Ghimire U., Sarpong G., Gude V. G. Transitioning wastewater treatment plants toward circular economy and energy sustainability. *ACS Omega*. 2021. Vol. 6, Iss. 18. P. 11794–11803. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c05827>.
4. Gude V. G. Energy and Water Autarky of Wastewater Treatment and Power Generation Systems. *Renewable Sustainable Energy Rev.* 2015. Vol. 45. P. 52–68. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.055>.
5. Holliger C., Fruteau de Lacroix H., Hack G. Methane production of full-scale anaerobic digestion plants calculated from substrate's biomethane potentials compares well with the one measured on-site. *Front. Energy Res.* 2017. Vol. 5. P. 12. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2017.00012>.
6. Iorhemen O., Hamza R., Tay J. Membrane Bioreactor (MBR) Technology for Wastewater Treatment and Reclamation: Membrane Fouling. *Membranes*. 2016. Vol. 6, № 2. P. 33. <https://doi.org/10.3390/membranes6020033>.
7. Kanaujiya D. K., Paul T., Sinharoy A., Pakshirajan K. Biological Treatment Processes for the Removal of Organic Micropollutants From Wastewater: A Review. *Current Pollution Reports*. 2019. Vol. 5. P. 112–128. <https://doi.org/10.1007/s40726-019-00110-x>.
8. Kong Z., Wu J., Rong C., Wang T. Large pilot-scale submerged anaerobic membrane bioreactor for the treatment of municipal wastewater and biogas production at 25 °C. *Bioresour. Technol.* 2021. Vol. 319. P. 124123. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124123>.
9. Luko-Sulato K., Mounier S., Moreira Furlan L., Govone J. S., Taitson Bueno G., Rosolen V. Spatial Variation of Soil Organic Matter and Metal Mobility in Wetland Soils: Implications for Biogeochemical Processes in Lateritic Landscape. *CATENA*. 2024. Vol. 237. P. 107810. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.107810>.
10. Neoh C. H., Noor Z. Z., Mutamim N. S. A., Lim C. K. Green Technology in Wastewater Treatment Technologies: Integration of Membrane Bioreactor With Various Wastewater Treatment Systems. *Chemical Engineering Journal*. 2016. Vol. 283. P. 582–594. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.07.060>.
11. Pandiarajan S., Sankararajan V. A Review of Advanced Solutions in Constructed Wetlands for Sustainable Wastewater Management. *Physics of Fluids*. 2025. Vol. 37, № 1. <https://doi.org/10.1063/5.0244570>.
12. Qu Y., Feng Y., Liu J., He W., Shi X., Yang Q., Lv J., Logan B. E. Salt removal using multiple microbial desalination cells under continuous flow conditions. *Desalination*. 2013. Vol. 317. P. 17–22. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2013.02.016>.
13. Rani A., Snyder S. W., Kim H. et al. Pathways to a net-zero-carbon water sector through energy-extracting wastewater technologies. *npj Clean Water*. 2022. Vol. 5. P. 49. <https://doi.org/10.1038/s41545-022-00197-8>.
14. Ravikumar Ja., Rajkumar S. Wastewater Treatment for Energy Conservation and Zero Carbon Footprint: A Review. *Energy Science & Engineering*. 2025. Vol. 13, Iss. 7. P. 3806–3820. <https://doi.org/10.1002/ese3.70142>.
15. Runze Xu, Li Y., Luo Y., Fang F., Feng Q., Cao J., Luo J. Prediction and Evaluation of Indirect Carbon Emission from Electrical Consumption in Multiple Full-Scale Wastewater Treatment Plants via Automated Machine Learning-Based Analysis. *ACS ES&T Engineering*. 2023. Vol. 3, № 3. P. 360–372. <https://doi.org/10.1021/acsestengg.2c00306>.
16. Shuo C., Hailong L. Achieving low-carbon and sustainable wastewater treatment by controlling the flow of pollutants: A pilot scale investigation on reducing greenhouse gas emissions and enhancing resource recovery. *Journal of Water Process Engineering*. 2024. Vol. 64. P. 105665. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.105665>.
17. Skoczko I., Puzowski P., Szatylowicz E. Experience From the Implementation and Operation of the Biological Membrane Reactor (MBR) at the Modernized Wastewater Treatment Plant in Wydminy. *Water*. 2020. Vol. 12, № 12. P. 3410. <https://doi.org/10.3390/w12123410>.
18. Tan X., Acquah I., Liu H., Li W., Tan S. A Critical Review on Saline Wastewater Treatment by Membrane Bioreactor (MBR) From a Microbial Perspective. *Chemosphere*. 2019. Vol. 220. P. 1150–1162. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.01.027>.

L. R. Hrytsak, Kh. M. Kolisnyk, N. M. Drobyk

Ternopil Volodymyr Hnatiuk National Pedagogical University, Ukraine

LOW-CARBON ENERGY GENERATION IN BIOLOGICAL WASTEWATER TREATMENT SYSTEMS

This article explores modern approaches to the transformation of energy-intensive wastewater treatment technologies within the framework of the water-energy nexus. It highlights the strong interdependence between water management systems and energy consumption, emphasizing that wastewater treatment plants remain highly reliant on fossil fuel energy sources, which significantly contribute to carbon dioxide (CO₂) emissions. The study also addresses the growing global volume of wastewater and the environmental risks associated with its insufficient treatment, including deterioration of surface and groundwater quality, degradation of aquatic ecosystems, soil contamination with toxic compounds, and the bioaccumulation of hazardous substances in food chains.

Special attention is given to the energy potential of wastewater as a source of renewable energy. It is shown that the implementation of energy recovery technologies can significantly increase the efficiency of wastewater treatment plants and reduce their carbon footprint. Innovative wastewater treatment technologies, including membrane bioreactors, anaerobic bioreactors, constructed wetlands, and microbial fuel cells, are analyzed. These technologies are characterized in terms of their operational principles, benefits, limitations, and technology readiness levels as well as the potential for integration into modern water treatment systems.

The findings demonstrate that integrating renewable energy systems into wastewater treatment processes can significantly reduce energy demand and carbon emissions. Moreover, such approaches enable the transition of wastewater treatment plants from energy consumers to energy-positive and potentially carbon-negative facilities. The study substantiates the importance of adopting circular economy principles in the water sector, promoting resource recovery, energy efficiency, and sustainable environmental management.

Overall, the implementation of advanced treatment technologies and integrated energy solutions is identified as a key pathway toward achieving climate neutrality and sustainable development goals in the context of increasing environmental challenges.

Keywords: environmental safety, water–energy nexus, wastewater, energy efficiency, membrane bioreactors, anaerobic processes, microbial fuel cells, carbon sequestration.

Надійшла до редакції: 02.12.2025

Прийнята до друку: 18.12.2025

Опублікована: 30.12.2025