

Scientific and technical journal «Technogenic and Ecological Safety»

RESEARCH ARTICLE
OPEN ACCESS

ЕМІСІЯ CO₂ З СПОРУД БІОЛОГІЧНОЇ ОЧИСТКИ СТІЧНИХ ВОД, ЩО ПРАЦЮЮТЬ ЗА СХЕМОЮ АО

В. О. Юрченко¹, І. А. Авдієнко¹, А. М. Христенко²¹Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, Харків, Україна²Stadtentwässerung Calw, Кальв, Федеративна Республіка Німеччина

УДК 628.3

DOI: 10.52363/2522-1892.2025.1.10

Отримано: 15 березня 2025

Прийнято: 24 квітня 2025

Cite as: Iurchenko V., Avdienko I., Khrystenko A. (2025). CO₂ emissions from biological wastewater treatment facilities operating under the AO scheme. Technogenic and ecological safety, 17(1/2025), 92–97. doi: 10.52363/2522-1892.2025.1.10

Анотація

Викиди парникових газів від міських очисних споруд є важливим фактором у контексті зміни клімату. Особливу увагу привертає емісія вуглекислого газу, який утворюється в процесах мінералізації органічних забруднень. Незважаючи на біогенне походження CO₂, саме він є найбільш об'ємним парниковим газом, що виділяється під час очищення стічних вод, однак часто недооцінюється або не враховується в національних і глобальних кліматичних звітах, що може занижувати реальний вплив міських очисних споруд на кліматичну систему. У роботі представлено результати кількісного визначення емісії вуглекислого газу на об'єктах біологічної очистки стічних вод, що працюють за схемою АО. Метою є визначення найбільш інтенсивних джерел викидів вуглекислого газу на окремих стадіях технологічного процесу та встановлення залежностей між умовами протікання процесів очищення і рівнем емісії. Експериментальні дослідження було проведено на очисних спорудах у Німеччині протягом двох окремих періодів, за умов різної добової інтенсивності надходження стічних вод. Концентрації CO₂ та O₂ у повітрі над поверхнею стічної води фіксувалися на різних стадіях очищення за допомогою високоточного аналітичного обладнання. Результати дослідження виявили чітку залежність між концентрацією розчиненого кисню та рівнем емісії CO₂. Результати дослідження виявили чітку залежність між концентрацією розчиненого кисню та рівнем емісії CO₂. Найбільші обсяги викидів спостерігалися в зоні аеротенків, що пояснюється активним перемішуванням і високою інтенсивністю біохімічного окиснення в аеробних умовах. Водночас у зонах із обмеженим надходженням кисню або в анаеробних умовах рівень емісії був значно нижчим.

Ключові слова: біологічна очистка стічних вод, викиди парникових газів, вимірювання викидів, розчинений кисень, аеротенк, денітрифікатор.

Постановка проблеми

Біологічна очистка стічних вод відіграє ключову роль у зменшенні антропогенного навантаження на природні водні екосистеми, проте вона, на жаль, супроводжується значними викидами парникових газів (ПГ), зокрема вуглекислого газу (CO₂), закису азоту (N₂O) та метану (CH₄), що суттєво впливає на негативні зміни клімату [1–3]. Джерела викидів включають безпосередні викиди від споруд, де відбуваються біологічні процеси очищення, та зовнішні опосередковані викиди від споживання енергії та шляхів скидання стічних вод з очисних споруд. Встановлено, що на сектори водопостачання та водовідведення припадає близько 2,8 % глобальних викидів ПГ [4]. Отже, функціонування систем водовідведення, включаючи очисні споруди каналізації, може спричиняти викиди парникових газів, які впливають на рівень екологічної безпеки регіону [5, 6].

Попри те, що метан і оксид азоту мають вищий потенціал глобального потепління, саме CO₂ є найбільшим за обсягом парниковим газом, який утворюється в процесах біологічної очистки. Емісія CO₂ на міських очисних спорудах каналізації формується як безпосередньо в результаті аеробної мінералізації органічних речовин [7], так і опосередковано – внаслідок споживання електроенергії для аерації та інших процесів, а також при скиданні очищених стічних вод у водні об'єкти. У звітах Міжурядової групи експертів зі

зміни клімату (IPCC) викиди вуглекислого газу (CO₂) з очисних споруд часто не враховуються у загальних показниках парникових газів, оскільки вони вважаються біогенними, тобто такими, що походять від природних біологічних процесів перетворення сучасних (біогенних) органічних речовин [8].

Однак, низка дослідників підкреслює, що викиди CO₂ можуть мати суттєвий вплив на кліматичні процеси, особливо у великих міських агломераціях [7]. Дослідження показали, що значна кількість виходного CO₂ викидається безпосередньо з очисних станцій, і якщо припустити те, що всі прямі викиди CO₂ є біогенними, можна недооцінити викиди ПГ. Так, дослідження [9, 10] підкреслює необхідність детального обліку цих викидів для розробки ефективних стратегій їх зменшення та досягнення вуглецевої нейтральності. В методичних рекомендаціях Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України (2023) [11] також вказується на необхідність оцінки викидів вуглекислого газу при здійсненні екологічних оцінок, що свідчить про визнання потенційного впливу цього чинника на клімат.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Як правило, при розрахунках викидів ПГ з біологічних очисних споруд процеси біологічного очищення поділяють лише на аеробні та анаеробні процеси, але нехтують диференціацією підкатегорій

аеробних або анаеробних технологій, що призводить до великої невизначеності коефіцієнтів викидів ПГ [12–14]. Wang, D. та ін. [10] створили широку базу даних щодо викидів парникових газів від муніципальних очисних споруд у Китаї за період 2006–2019 років, яка охоплює різні технології біологічної очистки, відповідні їм об'єми енергоспоживання та особливості скиду стічних вод. Проведені розрахунки виявили, що різні технології біологічного очищення мають значні відмінності у рівнях викидів ПГ.

Як свідчать матеріали досліджень [10], технологія АО забезпечує найнижчі питомі викиди CO_2 – 365,75 г/кг видаленого ХСК, тоді як технологія A^2O створює дещо вищі питомі викиди CO_2 – 375,53 г CO_2 /кг видаленого ХСК, процеси в окислюючих каналах – 510,65 г/кг, а процеси в SBR – 531,80 г/кг. Така різниця зумовлена як специфікою аераційних режимів, так і особливостями організації внутрішніх рециклів стічної води та активного мулу у відповідних технологічних схемах.

В рамках сучасних підходів до інвентаризації ПГ та вибору технологій з найменшим екологічним впливом визначення локацій найбільших викидів CO_2 на спорудах біологічної очистки стічних вод, що використовують різні підкатегорії аеробних й анаеробних технологій, має високу актуальність та велике природозахисне значення.

Постановка завдання та його вирішення

Метою даного дослідження є кількісна експериментальна оцінка емісії вуглекислого газу, що утворюється внаслідок процесів біологічної очистки стічних вод, на діючих очисних спорудах, які функціонують за схемою АО.

Задачі:

1. Фізико-хімічне аналітичне дослідження газоповітряної суміші над стічною водою в міських очисних спорудах;

2. Гідрохімічне дослідження складу стічних вод на різних етапах обробки;

3. Аналіз отриманих даних, визначення глибини окисно-деструктивних процесів в очисних спорудах та локацій найбільшої емісії вуглекислого газу.

Об'єкт дослідження – очисні споруди населеного пункту в Німеччині. Об'єм оброблюваних стічних вод становив 21 784 м³/добу (перше обстеження) і 9 383 м³/добу (друге обстеження).

Для проведення вимірювань викидів вуглекислого газу з різних споруд схеми очистки використовували сучасне обладнання Dräger X-am 7000 із програмним забезпеченням Software 2.nn. Даний прилад дозволяє здійснювати високоточні заміри концентрацій газів у реальному часі та застосовується для моніторингу промислових і природних об'єктів. Вимірювання виконували на висоті 10 см над рівнем стічної води. Відбір проб повітря здійснювався через шланг завдовжки 10 м. Для забезпечення коректності вимірювань та врахування часу транспортування газу до аналізатора реєстрація показників проводилася із затримкою. Фіксувалися виключно максимальні значення концентрацій.

Концентрацію кисню в стічній воді, що обробляється на досліджуваному об'єкті, вимірювали за допомогою портативного приладу Nach HQ2200. Гідрохімічний аналіз стічних вод на різних етапах очистки виконували за методиками, рекомендованими нормативними документами Німеччини – DEV – Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlamm-Untersuchung.

Результати і обговорення

На досліджуваному об'єкті біологічна очистка стічних вод здійснюється за схемою АО, що є однією з найефективніших технологій для глибокого очищення стічних вод (рис. 1). Ця схема включає два основні етапи: аноксидний та аеробний процеси. Особливістю цієї технології є наявність денітрифікаторів, розташованих перед аеротенками, що передбачає ефективне зниження вмісту азоту нітратів.

На рис. 2 представлено визначені концентрації розчиненого у стічній воді кисню впродовж всього технологічного процесу обробки міських стічних вод. Як видно, під час проходження очисних споруд вміст кисню в стічних водах коливався в межах від 0,13 до 3,43 мг/л. В приймальній камері він становив 1,25 мг/л, а під час механічної очистки в аеруємому піскоуловлювачі концентрація розчинного кисню в стічній воді не перевищувала 0,5 мг/л. Після невеликого підйому в кінці первинного відстійника концентрація розчинного кисню в стічній воді в круглому та прямокутному денітрифікаторах коливалась від 0,13 до 0,15 мг/л. Різке збільшення концентрації кисню в стічній воді спостерігалось при надходженні води в аеротенк (2,42...3,06 мг/л), що було зумовлено насиченням води киснем в результаті аерації. Навіть активне споживання кисню активним мулом в аеротенку при мінералізації органічних забруднень не вплинуло на зростання його концентрації в стічній воді. Максимальний рівень кисню в стічній воді (3,43 мг/л) був зафіксований на виході з вторинного відстійника, що можна пояснити наявністю залишкового кисню після завершення процесу окислення органічних забруднень на попередніх етапах обробки та відсутністю його віддувки через низьку турбулентність в споруді.

Результати досліджень газоповітряного середовища над поверхнею стічної води в механічних та біологічних очисних спорудах на досліджуваному об'єкті представлені на рис. 3, 4. На цих рисунках показана зафіксована в двох експериментах динаміка змін об'ємної частки кисню та вуглекислого газу у газоповітряному середовищі над спорудами під час процесу очистки стічних вод.

Як свідчать представлені дані, і в першому, і в другому експерименті, концентрація кисню в газоповітряній суміші над стічною водою на всіх етапах обробки без інтенсивної аерації (приймальна камера, піскоуловлювач, первинні відстійники, денітрифікатор (круглий), денітрифікатор прямокутний) була незмінною і становила 20,9 об. % (тобто практично, як в атмосферному повітрі – 20,95 об. %).

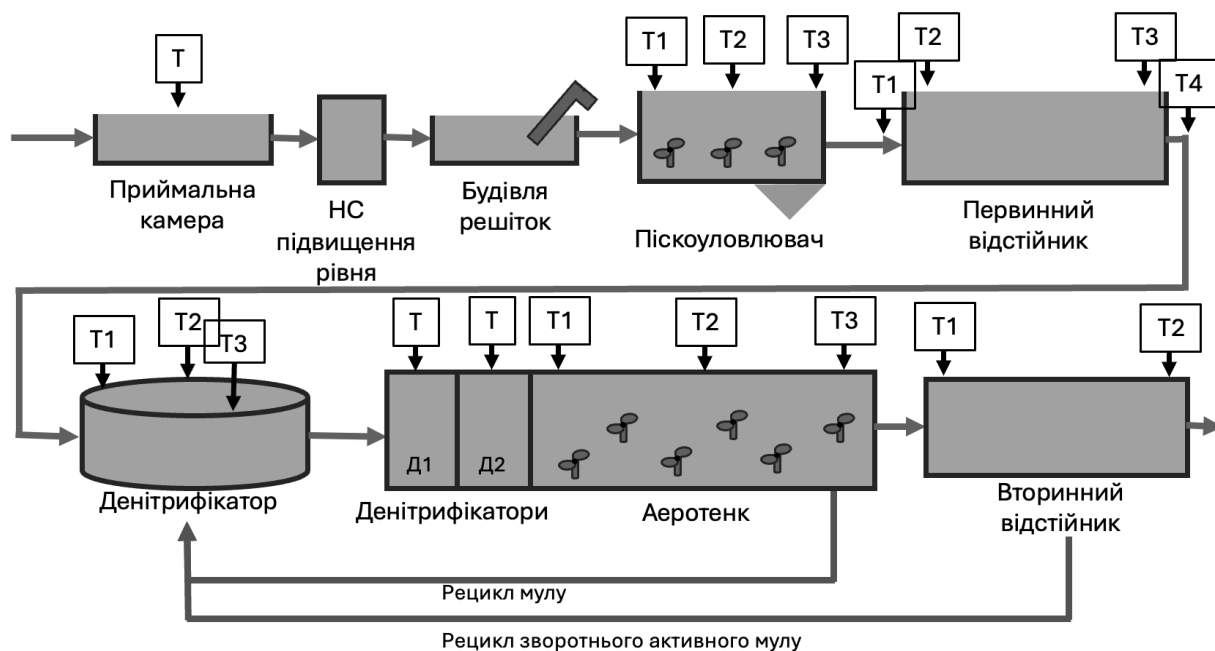


Рисунок 1 – Технологічна схема обробки стічних вод на досліджуваному об'єкті та точки проведення контролю

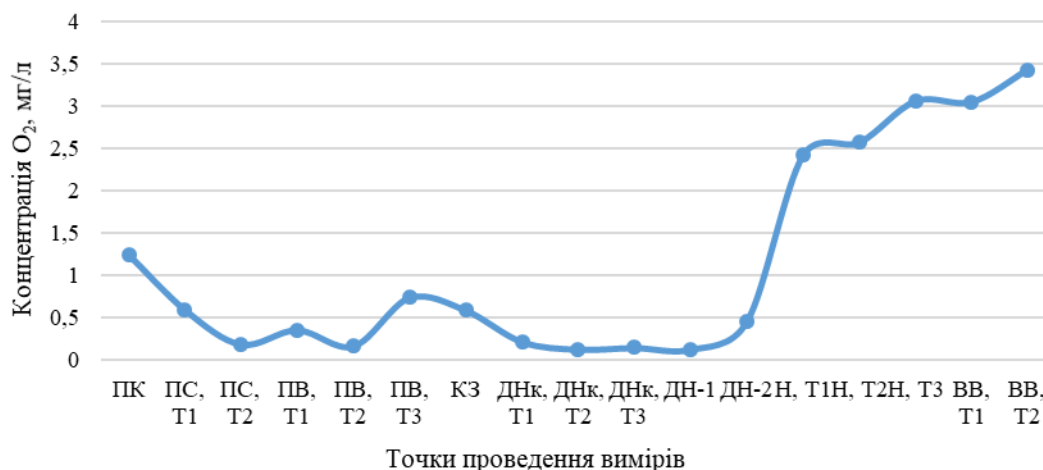


Рисунок 2 – Динаміка вмісту кисню у стічній воді на різних етапах обробки:

ПК – Приймальна камера; ПС – Піскоуловлювач (Т1 – початок; Т2 – середина, Т3 – кінець); ПВ – Первинні відстійники (Т1 – вхід, Т2 – початок, Т3 – кінець, Т3 – вихід); ДНк – Денітрифікатор (круглий) (Т1 – початок, Т2, Т3 – середина); ДН-1 – Денітрифікатор 1; ДН-2 – Денітрифікатор 2; Н – Аеротенк (Т1 – початок; Т2 – середина, Т3 – кінець); ВВ – вторинний відстійник (Т1 – початок; Т2 – кінець)

І тільки на початку обробки в аеротенку суттєво зменшувалась майже до 20,0 об.% (на 0,8 об.%), вірогідно, в результаті збільшення концентрації інших газів, які викидались з водного середовища в результаті активної віддувки. При подальшій обробці стічних вод в аеротенку концентрація O_2 в газоповітряній суміші над стічною водою зростає до концентрацій, відмічених над спорудами, де не застосовувалась інтенсивна аерація. В аеротенку це було зумовлено зменшенням викиду CO_2 і зменшенням його вмісту в контролюємому надводному середовищі. І хоча концентрація O_2 в стічній воді в аеротенку зростала (рис. 2), над водою

вона зменшувалась. Таким чином, більший вплив на концентрацію O_2 в газоповітряній суміші над стічною водою здійснювала не концентрація O_2 в стічній воді, а активність викиду CO_2 .

Отримані результати свідчать про практично однакові невеликі викиди CO_2 на ділянці денітрифікації (які практично не змінювали концентрацію CO_2 в атмосферному повітрі – 0,03...0,045 об.%), що зумовлено, напевно, низькою турбулентністю водного середовища, а, отже, й викидів газів, та невисокими швидкостями деструкції органічних забруднень в безкисневих умовах.

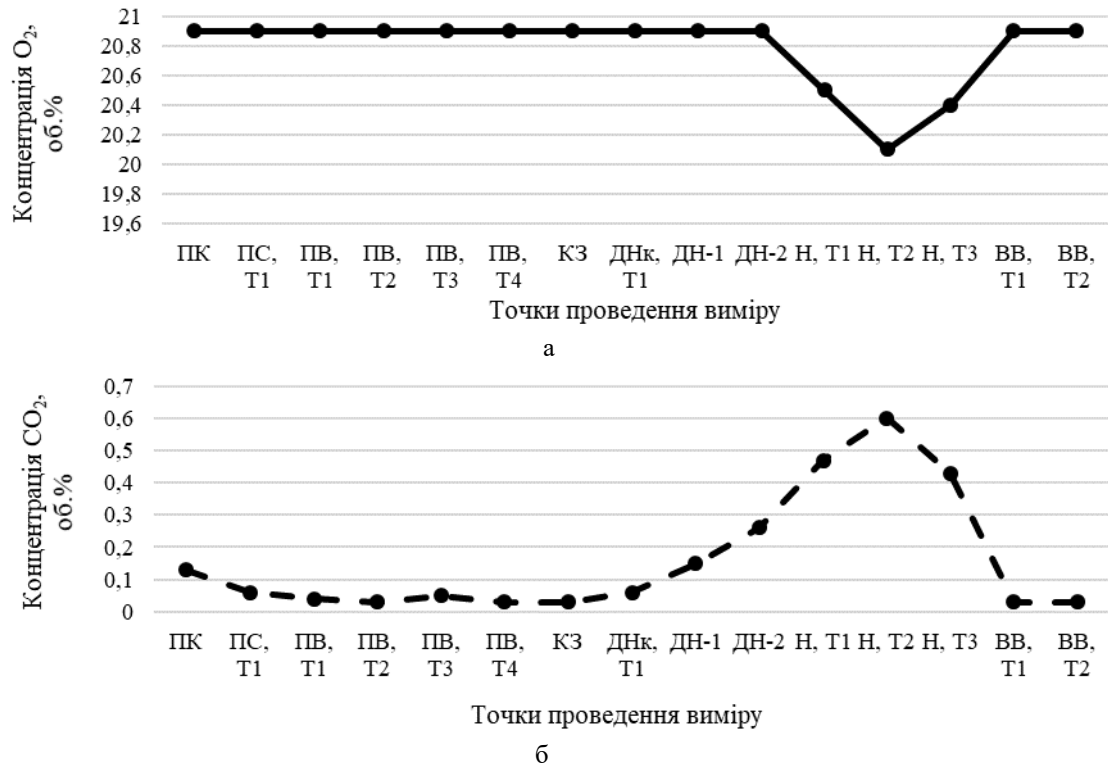


Рисунок 3 – Динаміка вмісту у газовій фазі O_2 (а) та CO_2 (б) (перший експеримент).
Позначення точок проведення вимірів як на рис. 2

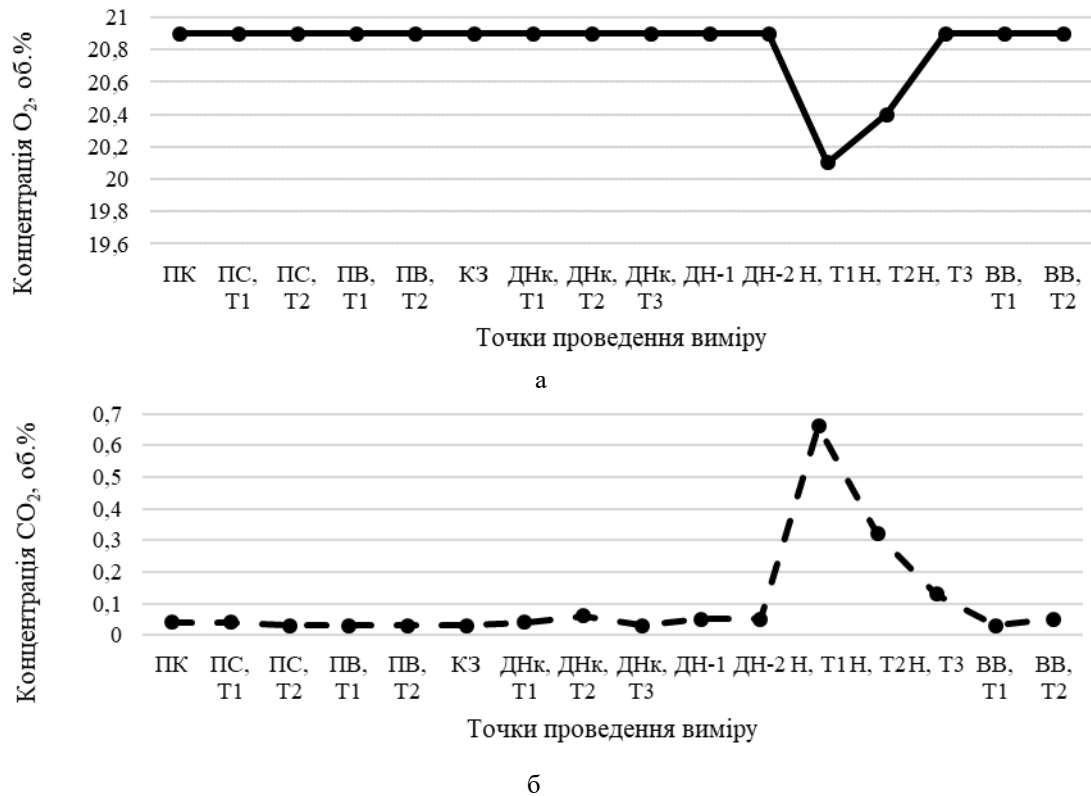


Рисунок 4 – Динаміка вмісту у газовій фазі O_2 (а) та CO_2 (б) (другий експеримент).
Позначення точок проведення вимірів як на рис. 2

Пікові викиди CO_2 були зафіксовані на етапі аерації та на виході з аеротенків, що пояснюється значно більш активним окисленням органічних речовин мікроорганізмами до CO_2 у присутності розчиненого кисню та інтенсивністю перемішування й віддувки. Концентрація CO_2 збільшувалась на 0,6 об.% при збільшенні концентрації O_2 на 0,8 об.%. Причому, як видно, активність викиду CO_2 зменшувалась по ходу аеротенка, що було зумовлено зменшенням концентрації органічних субстратів в стічній воді, а, отже і продукту їх мінералізації – CO_2 . Як в першому, так і в другому експерименті максимальне зростання викидів CO_2

корелює з падінням концентрації кисню в газовій фазі, що вказує на найбільшу біологічну окисно-деструктивну активність мулу в аеробному середовищі. У вторинному відстійнику концентрація CO_2 над стічною водою дорівнювала такій над очисними спорудами, що передували аеротенку, тобто не перевищували концентрацію CO_2 в атмосферному повітрі.

Гідрохімічні характеристики стічних вод по етапах обробки на досліджуваних очисних спорудах в період проведення експериментальних досліджень, представлено в табл. 1.

Таблиця 1 – Характеристика стічних вод на дослідженому об'єкті

Показник	Значення на вході в первинний відстійник	Значення на виході з первинного відстійника*	Значення на виході з очисних споруд
ХСК, мг О/л	164...440	98	17...19
$\text{N}_{\text{заг.}}$, мг/л	18,7...31,5	20,8	9,99...10,4
N-NH_4 , мг/л	9,16...19,6	13,2	0,09...0,54
N-NO_2 , мг/л	–	–	0,003...0,079
N-NO_3 , мг/л	1,23...3,43		8,61...9,95
$\text{P}_{\text{заг.}}$, мг/л	2,11...4,69	1,44	0,28...0,29

*Дані першого обстеження.

Як свідчать представлені дані, ефект очистки стічних вод за ХСК становив в середньому 92,3 %, за N загальним – 56,8 %, за N-NH_4 – 96,8 %, за P загальним – 90,2 %. Концентрації $\text{N-NO}_3 + \text{N-NO}_2$ на виході з очисних споруд практично дорівнювали концентрації видаленого N загального за мінусом N , що був асимільований пов'язано з органічними субстратами. А, отже, можна зробити висновок, що процеси денітрифікації на даних очисних спорудах були дещо загальмовані. Спостерігався високий ефект очистки стічних вод від сполук фосфору як за видаленням цих сполук, так і за дуже низькими залишковими концентраціями цього біогенного елементу. Це було зумовлено використанням хімічного методу видалення сполук фосфору з допомогою хімічних реагентів – солей заліза та алюмінію.

Висновки

На досліджених міських спорудах очистки стічних вод відмічена висока ефективність видалення органічних забруднень, контролюємих показником ХСК. Це зумовлює високий викид CO_2 з стічних вод в атмосферу, що підтверджує аналіз газоповітряного середовища над різними спорудами на досліджуваному об'єкті. Отже, зафіксований викид цього парникового газу кореспондується з висновками закордонних та вітчизняних фахівців щодо екологічної небезпеки експлуатації біологічних очисних споруд.

Як встановили експериментальні дослідження, найбільший викид CO_2 від споруд очистки міських стічних вод, що працюють за схемою АО, спостерігалася при обробці стічних вод в аеротенку: його концентрація в газоповітряній суміші над стічною водою підвищувалась майже в 13 разів (на 0,6 об.%). Над очисними спорудами, які не аерувались, концентрація CO_2 була на рівні його концентрації в атмосферному повітрі.

Головним чинником підвищення концентрації CO_2 в газоповітряній суміші над аеротенками було активне перемішування та викид CO_2 , накопиченого в стічній воді в аеробних умовах і при аноксидних процесах, які супроводжуються мінералізацією органічних сполук. Аналіз даних гідрохімічного контролю стічних вод свідчать про певне пригнічення процесів денітрифікації на дослідженому об'єкті. Таким чином, основна частина видаленого ХСК і, отже, основна маса викиду CO_2 зумовлена окисно-деструктивними процесами в аеробних умовах в аеротенку.

ПОДЯКА

Дослідження було проведено в рамках виконання проєкту «StormCompetence – Strengthening researchers' professional competencies on stormwater management for renovation of UA city infrastructure in the post-war time». Проєкт профінансовано програмою Swedish Institute.

ЛІТЕРАТУРА

1. Bani Shahabadi M., Yerushalmi L., Haghighat F. Impact of process design on greenhouse gas (GHG) generation by wastewater treatment plants. *Water Research*. 2009. Vol. 43, No. 10. P. 2679–2687.
2. Larsen T. A. CO_2 -neutral wastewater treatment plants or robust, climate-friendly wastewater management? A systems perspective. *Water Research*. 2015. Vol. 87. P. 513–521.
3. Sweetapple C., Fu G., Butler D. Identifying sensitive sources and key control handles for the reduction of greenhouse gas emissions from wastewater treatment. *Water Research*. 2014. Vol. 62. P. 249–259.

4. Insight into greenhouse gases emissions from the two popular treatment technologies in municipal wastewater treatment processes / T. K. L. Nguyen et al. *Science of the Total Environment*. 2019. P. 1302.
5. Numerical modelling of surface aeration and N₂O emission in biological water resource recovery / Y. Qiu et al. *Water Research*. 2024. Vol. 255. Art. 121398. DOI: 10.1016/j.watres.2024.121398.
6. Інвентаризація парникових газів при обробці промислових стічних вод в Україні / П. П. Кучерук та ін. *Екологічні науки*. 2013. № 4. С. 50–58.
7. Smith J., Johnson L., Brown M. Carbon dioxide emissions from wastewater treatment plants: Aerobic processes and organic matter mineralization. *Environmental Science Journal*. 2023. Vol. 45, No. 3. P. 112–125. DOI: 10.1016/j.envsci.2023.01.004.
8. Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. IPCC, 2019.
9. Wang X. Energy Consumption, Chemical Use and Carbon Footprints of Wastewater Treatment Alternatives: Assessment Methodology and Sustainability Solutions. Singapore: Springer, 2020. DOI: 10.1007/978-981-13-5983-5.
10. Greenhouse gas emissions from municipal wastewater treatment facilities in China from 2006 to 2019 / D. Wang et al. *Scientific Data*. 2022. Vol. 9. Art. 317. DOI: 10.1038/s41597-022-01174-w.
11. Ukraine's Greenhouse Gas Inventory 1990–2022. Annual National Inventory Report for Submission under the United Nations Framework Convention on Climate Change and the Kyoto Protocol 2024. URL: https://unfccc.int/sites/default/files/resource/Ukraine_NIR_2024.pdf (дата звернення 10.03.2025).
12. Kumar M., Dutta A. Greenhouse gas emissions from wastewater treatment plants: A review. *Environmental Research and Public Health*. 2019. Vol. 16, Issue. 10. P. 1839.
13. Wu G., Zhang Z. Identifying fossil origins of CO₂ emissions in biological processes. *Environmental Science and Technology*. 2021. Vol. 55, Issue. 12. P. 7113–7123. DOI: 10.1021/acs.est.1c00544. DOI: 10.3390/ijerph16101839.
14. IPCC. 2019. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change.

Iurchenko V., Avdienko I., Khrystenko A.

CO₂ EMISSIONS FROM BIOLOGICAL WASTEWATER TREATMENT FACILITIES OPERATING UNDER THE AO SCHEME

The biological treatment of municipal wastewater is an essential component of modern environmental protection strategies, significantly reducing the anthropogenic load on natural water ecosystems. However, this process is associated with substantial emissions of greenhouse gases, particularly CO₂, N₂O, and CH₄, which contribute to global climate change. Despite the recognized high warming potential of nitrous oxide and methane, carbon dioxide remains the most voluminous greenhouse gas released during biological wastewater treatment. Yet, due to its biogenic origin, these emissions are often underestimated or excluded from national and global inventories, potentially distorting the actual impact of urban wastewater treatment plants on the climate system.

This study focuses on the quantitative assessment of carbon dioxide emissions generated during the aerobic treatment of municipal wastewater at a full-scale treatment facility operating under the anoxic-oxic scheme. The research aims to determine the locations and stages within the technological process that are characterized by the highest intensity of carbon dioxide emissions, thereby contributing to the identification of emission hotspots and the development of climate-conscious technological improvements.

Experimental measurements were carried out at a treatment plant in Germany with varying daily inflow capacities during two separate observation periods. Using high-precision analytical equipment, the concentration of carbon dioxide and oxygen in the air above the wastewater surface was measured across multiple treatment stages. Complementary physicochemical and hydrochemical analyses of the wastewater were performed to determine the oxygen content and degradation intensity of organic pollutants throughout the system.

The results revealed a distinct correlation between the oxygen concentration in treated wastewater and the level of carbon dioxide emissions at various stages. The highest levels of carbon dioxide were recorded in zones where biological oxidation was most intense, particularly in the aeration tanks. In contrast, areas with limited aeration or anaerobic conditions exhibited lower emission levels.

Key words: biological wastewater treatment, greenhouse gas emissions, carbon dioxide, emission measurement, aeration tank, denitrification tank, dissolved oxygen.

REFERENCES

1. Bani Shahabadi, M., Yerushalmi, L., & Haghighat, F. (2009). Impact of process design on greenhouse gas (GHG) generation by wastewater treatment plants. *Water Research*, 43(10), 2679–2687. DOI: 10.1016/j.watres.2009.03.016.
2. Larsen, T. A. (2015). CO₂-neutral wastewater treatment plants or robust, climate-friendly wastewater management? A systems perspective. *Water Research*, 87, 513–521. DOI: 10.1016/j.watres.2015.09.011.
3. Sweetapple, C., Fu, G., & Butler, D. (2014). Identifying sensitive sources and key control handles for the reduction of greenhouse gas emissions from wastewater treatment. *Water Research*, 62, 249–259. DOI: 10.1016/j.watres.2014.05.028.
4. Nguyen, T. K. L., Ngo, H. H., Guo, W., Chang, S. W., Nguyen, D. D., & Nghiem, L. D. (2019). Insight into greenhouse gases emissions from the two popular treatment technologies in municipal wastewater treatment processes. *Science of the Total Environment*, 1302, 1–8. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.1302.
5. Qiu, Y., Ekström, S., Valverde-Pérez, B., Smets, B. F., Climent, J., Domingo-Féiz, C., Martínez Cuenca, R., & Plósz, B. G. (2024). Numerical modelling of surface aeration and N₂O emission in biological water resource recovery. *Water Research*, 255, 121398. DOI: 10.1016/j.watres.2024.121398.
6. Kucheriuk, P. P., Matveiev, Y. B., Shlykhta, V. M., Mozharovska, E. A., & Zakharchuk, Y. V. (2013). Inventaryzatsiia parnykovykh haziv pry obrobtsi promyslovykh stichnykh vod v Ukraini [Inventory of greenhouse gases during the treatment of industrial wastewater in Ukraine]. *Ecological Sciences*, 4, 50–58. [in Ukrainian]
7. Smith, J., Johnson, L., & Brown, M. (2023). Carbon dioxide emissions from wastewater treatment plants: Aerobic processes and organic matter mineralization. *Environmental Science Journal*, 45(3), 112–125. DOI: 10.1016/j.envsci.2023.01.004.
8. IPCC. (2019). *Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*.
9. Wang, X. (2020). *Energy consumption, chemical use and carbon footprints of wastewater treatment alternatives: Assessment methodology and sustainability solutions*. Springer Singapore. DOI: 10.1007/978-981-13-5983-5.
10. Wang, D., Ye, W., Wu, G., Li, R., Guan, Y., Zhang, W., Wang, J., Shan, Y., & Hubacek, K. (2022). Greenhouse gas emissions from municipal wastewater treatment facilities in China from 2006 to 2019. *Scientific Data*, 9, 317. DOI: 10.1038/s41597-022-01174-w.
11. *Ukraine's Greenhouse Gas Inventory 1990–2022. Annual National Inventory Report for Submission under the United Nations Framework Convention on Climate Change and the Kyoto Protocol 2024*. (2024). URL: https://unfccc.int/sites/default/files/resource/Ukraine_NIR_2024.pdf.
12. Kumar, M., & Dutta, A. (2019). Greenhouse gas emissions from wastewater treatment plants: A review. *Environmental Research and Public Health*, 16(10), 1839. DOI: 10.3390/ijerph16101839.
13. Wu, G., & Zhang, Z. (2021). Identifying fossil origins of CO₂ emissions in biological processes. *Environmental Science and Technology*, 55(12), 7113–7123. DOI: 10.1021/acs.est.1c00544.
14. IPCC. (2019). *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Intergovernmental Panel on Climate Change.