

**Авдієнко І. А.**, аспірант;

**Юрченко В. О.**, д-р техн. наук, проф.

*Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова,  
м. Харків, Україна*

## **ПРОБЛЕМА ВИКИДІВ ПАРНИКОВИХ ГАЗІВ НА МІСЬКИХ СПОРУДАХ ОЧИЩЕННЯ СТІЧНИХ ВОД**

Муніципальні очисні споруди (ОС) є критично важливими елементами системи водопостачання та водовідведення, оскільки забезпечують зменшення антропогенного навантаження на водні об'єкти та підтримання санітарно-епідеміологічної безпеки. Разом із тим їх експлуатація супроводжується емісіями парникових газів (ПГ), серед яких домінують вуглекислий газ ( $\text{CO}_2$ ), метан ( $\text{CH}_4$ ) та закис азоту ( $\text{N}_2\text{O}$ ), що суттєво впливають на кліматичні процеси [1–3]. Особливе занепокоєння викликає ситуація на вітчизняних ОС, де переважно застосовуються застарілі технологічні рішення, не здатні забезпечити ефективне видалення азотних сполук. Це зумовлює інтенсивне утворення  $\text{N}_2\text{O}$  — парникового газу з надзвичайно високим потенціалом глобального потепління (GWP), який більш ніж у 265 разів перевищує відповідний показник для  $\text{CO}_2$ .

Методологія IPCC (2019) класифікує  $\text{CO}_2$ , що утворюється у процесах біологічного очищення стічних вод, як біогенний, у зв'язку з чим його не враховують у національних інвентаризаціях [4]. Водночас наукові дослідження останніх років доводять, що істотна частка цих емісій може бути пов'язана з окисненням синтетичних органічних сполук і, відповідно, мати викопну природу [5–7]. Нехтування даним чинником може зумовити недооцінку реального внеску очисних споруд у зміну клімату.

Крім того, недостатня ефективність процесів очищення стічних вод призводить до підвищеного вмісту забруднювальних речовин у скидах, що, у свою чергу, може спричиняти вторинні емісії парникових газів у природних водоймах [8]. У зв'язку з цим комплексний аналіз утворення та динаміки викидів  $\text{CO}_2$  і  $\text{N}_2\text{O}$  під час біологічної очистки стічних вод та після їхнього скиду є необхідним для підвищення екологічної ефективності муніципальних очисних споруд і забезпечення адекватного відображення їхнього внеску у глобальний вуглецевий баланс.

**Мета дослідження** — кількісна оцінка питомих викидів вуглекислого газу ( $\text{CO}_2$ ) та закису азоту ( $\text{N}_2\text{O}$ ), що утворюються під час біологічної очистки стічних вод та після їх скиду у природні водойми.

Викиди метану ( $\text{CH}_4$ ) у рамках цього дослідження не оцінювались через обмеженість наявних вихідних даних.

**Об'єкт дослідження** — міські очисні споруди міста Харків (МОСВ №2, 225 000 м³/добу) та очисні споруди одного з населених пунктів у Німеччині (15 890 м³/добу).

Для кількісної оцінки питомих викидів парникових газів на досліджуваному об'єкті проведено розрахунок потенційних викидів закису азоту (N<sub>2</sub>O) та вуглекислого газу (CO<sub>2</sub>) під час очищення та скиду стічних вод. Обчислення здійснювалися відповідно до методичних рекомендацій Міжурядової групи експертів зі зміни клімату (IPCC, 2019) [4], із використанням коефіцієнтів викидів та уточнених даних із досліджень Ванга Д. та співавторів [8]. Викиди N<sub>2</sub>O були переведені у CO<sub>2</sub>-еквіваленти з урахуванням потенціалу глобального потепління, який для N<sub>2</sub>O становить 265, а для CO<sub>2</sub> — 1.

Розрахунок парникових газів, що утворюються на очисних спорудах, виконували за наступними рівняннями:

$$N_2O_{bio,i} = EF_{bio,N_2O,j} * TN_{in,i} * 265 \quad (1)$$

$$CO_{2bio,i} = EF_{bio,CO_2,j} * COD_{removed,i} \quad (2)$$

де N<sub>2</sub>O<sub>bio,i</sub> та CO<sub>2</sub><sub>bio,i</sub> — це викиди N<sub>2</sub>O та CO<sub>2</sub> (г CO<sub>2</sub> екв/рік) від біологічного очищення на ОС; EF<sub>bio, N<sub>2</sub>O,j</sub> (г N<sub>2</sub>O/кг TN) та EF<sub>bio, CO<sub>2</sub>,j</sub> (г CO<sub>2</sub>/кг вилученого ХСК) — відповідні коефіцієнти викидів для процесу АО. TN<sub>in,i</sub> — річна маса загального азоту у вхідному потоці (кг/рік), COD<sub>removed,i</sub> — річна кількість вилученого ХСК (кг/рік) 265 — коефіцієнт перерахунку N<sub>2</sub>O в CO<sub>2</sub>-еквівалент.

Викиди парникових газів під час скиду очищених стічних вод у природні водойми оцінювалися з використанням відповідних розрахункових формул:

$$N_2O_{eff,i} = EF_{eff,N_2O,j} * TN_{out,i} * 265 \quad (3)$$

$$CO_{2eff,i} = EF_{eff,CO_2,j} * COD_{out,i} \quad (4)$$

де N<sub>2</sub>O<sub>eff,i</sub> та CO<sub>2</sub><sub>eff,i</sub> — це викиди N<sub>2</sub>O та CO<sub>2</sub> (г CO<sub>2</sub> екв/рік) від шляху скиду; EF<sub>eff, N<sub>2</sub>O,j</sub> (г N<sub>2</sub>O/кг TN на виході) та EF<sub>eff, CO<sub>2</sub>,j</sub> (г CO<sub>2</sub>/кг COD на виході) — це коефіцієнти викидів для шляху скиду; COD<sub>out,i</sub> (кгCOD вихід/рік) та TN<sub>out,i</sub> (кг TN вихід/рік) — це маси ХСК та N<sub>заг.</sub> на виході за рік.

Для очисних споруд міста Харків (МОСВ №2) концентрації забруднюючих речовин у вхідних стічних водах становили: ХСК — 420 мг/л та N<sub>заг</sub> — 50 мг/л, тоді як у очищених стоках залишкові концентрації знизилися до ХСК — 60 мг/л та N<sub>заг</sub> — 33,5 мг/л (табл. 1). Це відповідає ефективності видалення органічних речовин на рівні 85,7%, тоді як видалення загального азоту становило лише 33%. Дані свідчать про те, що МОСВ №2 забезпечують високий рівень очищення стічних вод від органічних забруднень, проте видалення азоту залишається недостатнім, що вказує на потребу вдосконалення технологій. Слід також враховувати, що водний об'єкт, який приймає очищені стоки — річка Уди глибоко евтрофікована.

Таблиця 1 – Порівняння питомих викидів парникових газів з МОСВ №2 м. Харків та на досліджуваному об'єкті у Німеччині.

| Характеристика стічних вод                                            |                                                               | Питомий викид парникових газів,<br>тCO <sub>2</sub> екв/м <sup>3</sup> СВ |                 |                                   |                 |
|-----------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|-----------------|-----------------------------------|-----------------|
| Концентрація Nзаг<br>$\frac{\text{вхід}}{\text{вихід}}$ , мг/л        | Концентрація ХСК<br>$\frac{\text{вхід}}{\text{вихід}}$ , мг/л | Під час очистки<br>стічних вод                                            |                 | Після скиду СВ у<br>водний об'єкт |                 |
|                                                                       |                                                               | N <sub>2</sub> O                                                          | CO <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> O                  | CO <sub>2</sub> |
| <b>Очисні споруди м. Харків, Україна (225 000 м<sup>3</sup>/добу)</b> |                                                               |                                                                           |                 |                                   |                 |
| $\frac{50}{33,5}$                                                     | $\frac{420}{60}$                                              | 0.00033                                                                   | 0.0002          | 0.00007                           | 0.00003         |
| <b>Очисні споруди в Німеччині (15 890 м<sup>3</sup>/добу)</b>         |                                                               |                                                                           |                 |                                   |                 |
| $\frac{30,5}{9,29}$                                                   | $\frac{363,13}{18,13}$                                        | 0,0002                                                                    | 0,0001          | 0,000019                          | 0,00001         |

На досліджуваних очисних спорудах Німеччини концентрації забруднень у вхідних стічних водах складали: ХСК – 363,13 мг/л та Nзаг – 30,5 мг/л, тоді як після очистки залишкові концентрації становили: ХСК – 18,13 мг/л та Nзаг – 9,29 мг/л. Відповідно, ефективність видалення органічних забруднень досягала 95%, а загального азоту – 69,5%, що свідчить про значно вищий рівень технологічної ефективності очисних споруд. Проте, неповне видалення загального азоту (за рахунок високих концентрацій нітратів) вказує на недостатню активність процесів денітрифікації.

Аналіз даних таблиці свідчить, що питомі викиди парникових газів під час очистки стічних вод на МОСВ №2 перевищують відповідні показники досліджуваного об'єкта в Німеччині приблизно у 2–2,5 рази. Після скиду очищених стоків у водний об'єкт різниця у викидах залишається суттєвою: питомі викиди N<sub>2</sub>O у Харкові перевищують німецькі приблизно у 3,7 рази, а CO<sub>2</sub> – у 3 рази, що підтверджує нижчу ефективність технологічних процесів та більший негативний екологічний вплив.

## Висновки

1. Розрахунок викидів парникових газів показав, що основним джерелом кліматичного навантаження на обох об'єктах є N<sub>2</sub>O. Питомі викиди N<sub>2</sub>O у CO<sub>2</sub>-еквіваленті під час біологічної очистки стічних вод у Харкові перевищують викиди CO<sub>2</sub> приблизно у 1,65 рази, а після скидання очищених стоків — майже у 2,3 рази. Така ситуація зумовлена недостатньою ефективністю видалення азоту при очистці міських стічних вод, що підкреслює необхідність забезпечення процесів денітрифікації.

2. Викиди  $\text{CO}_2$ , пов'язані з розкладом залишкових органічних речовин у водних об'єктах після скидання стоків, були відносно невеликими, що свідчить про високу ефективність процесу видалення органічних забруднень на обох досліджуваних ОС.

3. Порівняльний аналіз питомих викидів показав, що на етапі очищення загальні викиди парникових газів на об'єкті в Німеччині приблизно у 2–2,5 рази нижчі, ніж на МОСВ №2 у Харкові. Після скиду стічних вод різниця у викидах  $\text{N}_2\text{O}$  становить майже у 3,7 рази, а  $\text{CO}_2$  — у 3 рази, що відображає нижчу технологічну ефективність МОСВ №2 Харків та більший негативний екологічний вплив.

4. Отримані результати підкреслюють необхідність модернізації технологічних процесів на вітчизняних очисних спорудах, особливо щодо підвищення ефективності видалення азоту, що дозволить значно зменшити парникові викиди та знизити негативний кліматичний вплив цих систем водовідведення.

### **Література**

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.
2. Larsen, T. A. (2015).  $\text{CO}_2$ -neutral wastewater treatment plants or robust, climate-friendly wastewater management? A systems perspective. *Water Research*, 87, 513–521.
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.
4. IPCC. (2019). 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, Switzerland.
5. Schneider, A. G., Townsend-Small, A., & Rosso, D. (2015). Impact of direct greenhouse gas emissions on the carbon footprint of water reclamation processes employing nitrification–denitrification. *Science of The Total Environment*, 505, 1166–1173.
6. Tseng, L. Y., et al. (2016). Identification of Preferential Paths of Fossil Carbon within Water Resource Recovery Facilities via Radiocarbon Analysis. *Environmental Science & Technology*, 50, 12166–12178.
7. Bao, Z., Sun, S., & Sun, D. (2015). Characteristics of direct  $\text{CO}_2$  emissions in four full-scale wastewater treatment plants. *Desalination and Water Treatment*, 54, 1070–1079.
8. 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(1). <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01194-5>

**\*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.***