

# Про систему керування анаеробним біореактором для ефективної очистки стічних вод

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2023.043>

Андрій Сафоник

Навчально-науковий інститут енергетики,  
автоматики та водного господарства  
Національний університет водного господарства та  
природокористування  
м. Рівне, Україна  
[a.p.safonyk@nuwm.edu.ua](mailto:a.p.safonyk@nuwm.edu.ua)

Олена Полухович

Інформаційно-обчислювальний центр  
Національний університет водного господарства та  
природокористування  
м. Рівне, Україна  
[o.o.polyukhovych@nuwm.edu.ua](mailto:o.o.polyukhovych@nuwm.edu.ua)

*Анотація*—Враховуючи те, що збереження енергії та економія енергоємних ресурсів стають все більш актуальними завданнями сьогодення, зокрема в керуванні очисткою стічних вод, розглянуто використання анаеробних біореакторів для очищення стічних вод і отримання біогазу. Запропоновано низку цільових макростанів, які дозволяють оптимізувати процес очищення та використання біогазу. Ці цільові макростани включають зниження концентрації органічних забруднень у воді, збільшення виробництва біогазу та контроль концентрації органічних кислот у реакційному середовищі.

**Ключові слова**—Анаеробний біореактор; системи очищення стічних вод; біогазовиробництво; цільові макростани; ефективність очищення; енергоефективність системи.

## I. ВСТУП

Вода є одним з найбільш важливих ресурсів нашої планети і забезпечення її якісною та ефективною очисткою стає все актуальнішим завданням в умовах всебічного зростання забруднення та обмежених ресурсів. Одним із ключових аспектів ефективної очистки стічних вод є використання біореакторів на основі анаеробних процесів, які дозволяють не лише зменшувати забруднення води, але й виробляти цінний біогаз як побічний продукт.

В даній роботі розглядалися основні аспекти керування та оптимізації анаеробних біореакторів для очищення стічних вод і отримання біогазу. Запропоновано цільові макростани, які дозволяють підтримувати оптимальний рівень очищення та виробництва біогазу, забезпечуючи при цьому стабільність та енергоефективність процесу.

Також було запропоновано можливість зменшення розмірів анаеробного біореактора для локального очищення стічних вод і оптимізовано час перебування стоку в біореакторі. Впровадження запропонованих цільових макростанів та систем керування дозволило збільшити ефективність очисної системи та збереженню ресурсів у процесі очищення стічних вод.

## II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Для досягнення результатів у процесі роботи системи біологічної очистки витрачаються різні ресурси, такі як стічна вода, що піддається процедурі очищення, капітальні витрати, необхідні для будівництва очисних споруд, а також експлуатаційні та тимчасові витрати на проведення очищення.

На основі даних наведених в [1, 2] були обрані найбільш вживані показники ефективності, а саме:

1. Ступінь очищення стічної води (Removal Efficiency): Виражає, наскільки успішно стічні води очищаються від забруднень. Це відношення концентрації забруднень до і після очищення.
2. Гідравлічний час перебування стоку на очищенні (Hydraulic Retention Time, HRT): Визначає, скільки часу стічні води перебувають у біореакторі, що впливає на розмір споруди.
3. Навантаження органічної речовини (Organic Load Rate, OLR): Вимірює кількість оброблених забруднень в одиницю часу, виражену в одиницях ХПК.
4. Енергоспоживання системи: враховує витрати енергії на роботу системи, зокрема на обігрів біореактора.
5. Продуктивність біогазу: вимірює кількість біогазу та метану, що виробляється в процесі очищення.
6. Критерій інтенсивності утворення біогазу: визначає ступінь перетворення органічних забруднень у біореакторі.
7. Енергоефективність системи: розглядає витрати і вироблену енергію, зокрема енергію, отриману з біогазу.
8. Якість очищення стічних вод: визначається концентрацією забруднень в очищеній воді відносно початкової.

9. Інтенсивність процесів очищення: вимірюється продуктивністю системи на одиницю робочого об'єму апарату.

Ці показники допомагають в оцінці ефективності систем очищення стічних вод і виборі оптимальних стратегій керування ними.

Виходячи з обраних показників ефективності було запропоновано формалізацію цільових макростанів біологічного очищення у системі стічних вод під час експлуатації стаціонарних біологічних очисних споруд. Ця методологія дозволяє сформулювати цільові макростани, які є експертно заданими функціями від змінних стану системи.

Для забезпечення стабільності та досягнення цих цільових макростанів у системі керування біологічної очистки розроблені алгоритми, які забезпечують інваріантність їх до фазового потоку, тобто забезпечують відповідність цих макростанів в умовах зміни динамічних параметрів системи.

### III. ВИРШЕННЯ ПОСТАВЛЕНОЇ ЗАДАЧІ

Аналогічно до [2] було сформовано двовимірні макрозмінні  $c \in \square^n$  для випадку  $u \in \square^n$  (наприклад, за змінними  $T$  (температура) та  $C_{in}$  (витрата стічної води в біореакторі)).

1. Основною метою функціонування біореактора в системі очищення стічних вод є зниження концентрації органічного забруднення стічної води до (або нижче) заданого нормативного значення  $C_{norm}$ . При цьому бажано максимально повно перетворити забруднення на біогаз. Якщо  $G^*$  – розрахункова кількість біогазу, яку можна отримати із заданої сировини, для системи анаеробного біологічного очищення, то метою керування даним процесом буде:

$$\begin{aligned} c_1^*(t) &= C(u(t)) \rightarrow 1; \\ c_2^*(t) &= G_{out}(t) - G^* \rightarrow 0, t \rightarrow \infty. \end{aligned} \quad (1)$$

2. Збільшення кількості газу не завжди призводить до підвищення енергоефективності  $E(t)$  системи через збільшення витрат на обігрів біореактора [3-5]. Формалізація цільового макростану для системи очищення стічних вод через запропоновані критерії якості та енергоефективності системи біологічної очистки, набуде вигляду:

$$\begin{aligned} c_1^*(t) &= C(u(t)) \rightarrow 1; \\ c_2^*(t) &= E(t) \rightarrow \max, t \rightarrow \infty. \end{aligned} \quad (2)$$

3. Одним з основних факторів, які негативно впливають на життєдіяльності анаеробної біомаси є вміст у реакційному середовищі високих концентрацій органічних кислот  $P$ , що є проміжним продуктом процесу. Для

анаеробної біомаси можна визначити граничне значення концентрації органічних кислот  $P^*$  в робочій зоні біореактора, при якому починається сповільнення процесу очищення. Тому відповідна мета керування:

$$\begin{aligned} c_1^*(t) &= C(u(t)) \rightarrow 1; \\ c_2^*(t) &= P(t) - P^* \rightarrow 0, t \rightarrow \infty, (P(t) \leq P^*). \end{aligned} \quad (3)$$

4. Локальні очисні споруди встановлюються безпосередньо на території підприємства, тому важливим є скорочення розмірів анаеробного біореактора. Відповідно, зменшення часу  $HRT$ , що визначає розмір біореактора, при забезпеченні заданої якості очищення при мінливих вхідних параметрах системи може розглядатися як мета керування:

$$\begin{aligned} c_1^*(t) &= C(u(t)) \rightarrow 1; \\ c_2^*(t) &= HRT - HRT^* \rightarrow 0, t \rightarrow \infty. \end{aligned} \quad (4)$$

Сформульовані цільові макростани (1) – (4) задають бажані закони функціонування системи анаеробної біологічної очистки стічних вод, покладено основою синтезу систему керування станами біореактора.

### IV. ВИСНОВКИ

Розроблена система керування анаеробним біореактором на основі цільових макростанів забезпечує стабілізації концентрації органічних забруднень на виході з біореактора на заданому рівні при впливі факторів, які можуть дестабілізувати процес очищення. Паралельно показано збільшення виходу біогазу з біореактора при збереженні допустимої якості очищення. В перспективі для досягнення наведених цілей, необхідно розробити та впровадити ефективні алгоритми керування, які враховуватимуть динаміку процесів, що протікають в біореакторі, а також оптимізацію балансу між очищенням стічних вод та отриманням біогазу.

### ЛІТЕРАТУРА

- [1] C. A. de Lemos Chernicharo, "Anaerobic reactors," Biologic Wastewater Treatment Series, vol. 4, London: IWA Publishing, 2007.
- [2] J. Mata-Álvarez, J. Dosta, M.S. Romero-Güiza, X. Fonoll, M. Peces, and S. Astals, "A critical review on anaerobic co-digestion achievements between 2010 and 2013," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 36, 2014, pp. 412–427.
- [3] Гарашенко В.І., Сафоник А.П., Гарашенко О.В. Математичне моделювання процесів магнітного фільтрування і регенерації та оцінка їх ефективності. Вісник ТДТУ імені І. Пулюя. 2012. Вип. 2(66). С. 242–248.
- [4] Гарашенко В. І., Гарашенко О. В., Лебедь О. О., Сафоник А. П., Кочергіна О. Д. Теоретичні основи процесу осадження магнітних домішок в намагнічених феромагнітних загрузках. Вісник НУВГП: зб. наук. пр. Рівне : НУВГП, 2014. Вип. 1(65). С. 390–397.
- [5] Сафоник А.П., Грицюк І.М., Таргоній І.М. Динамічна оптимізація системи автоматичного керування технологічним процесом очищення води. Біоніка інтелекту: наук.-техн. журнал. 2021. Вип. 2(97). С. 50–61.