

- review // *Bioresource Technology*. – 2024. – Vol. 413. – P. 131518. – DOI: 10.1016/j.biortech.2024.131518.
5. Ghafari-Arsoon F., Ramezani O., Partovinia A. Optimization of immobilized activated sludge performance in electro-sprayed matrices for treatment of cellulose industry wastewater // *Scientific Reports*. – 2025. – Vol. 15. – P. 32155. – DOI: 10.1038/s41598-025-16985-4.
 6. Ogundolie F. A., Oyewole Babalola O., Adetunji C. O., Aruwa C. E. A review on bioremediation by microbial immobilization—an effective alternative for wastewater treatment // *AIMS Environmental Science*. – 2024. – Vol. 11, No. 6. – P. 918–939. – DOI: 10.3934/environsci.2024046.

ПРИКЛАДНІ МЕТОДИ МОНІТОРИНГУ ТА АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ БІОПРОЦЕСАМИ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТАБІЛЬНОСТІ Й ЯКОСТІ

Грицина О.О.

*Національний університет водного господарства та природокористування,
м. Рівне, о.о.hrytsyna@nuwm.edu.ua*

В останні десятиліття важливість надійних стратегій моніторингу та контролю в біопроцесах стає все більш очевидною, особливо в сферах водоочищення та екологічної біотехнології. У міру інтенсифікації урбанізації та погіршення дефіциту води біотехнологічні підходи до відновлення та повторного використання води обумовлені критичними практичними та науковими потребами. Ефективний моніторинг біопроцесів не тільки забезпечує стабільність і якість операцій з очищення води, але й лежить в основі сталого, ресурсоефективного та стійкого управління навколишнім середовищем - завдання, яке ускладнюється зростанням обсягів забруднення, більш суворими нормативними вимогами та необхідністю відновлення цінних ресурсів із потоків відходів [1]. У цьому контексті передові технології моніторингу та автоматизації, включаючи інновації в області сенсорів, машинне навчання та модельне управління, стали необхідними інструментами для забезпечення надійності біопроцесів, якості продукції та зменшення впливу на навколишнє середовище у всьому спектрі сучасного управління водою та стічними водами зокрема [2].

Протягом останніх кількох років значні досягнення в області моніторингу біопроцесів та автоматичного управління змінили ландшафт екологічної біотехнології. Перехід до прийняття рішень у режимі реального часу на основі даних значно поліпшив не тільки ефективність процесів, але й здатність динамічно адаптуватися до нестаціонарних або непередбачених збурень у складних біопроцесних системах [3].

Незважаючи на значний прогрес, залишаються невирішені критичні проблеми. Головними з них є властива біологічним системам нелінійність і мінливість, які ускладнюють точне моделювання, моніторинг та автоматичний контроль; обмежена надійність і селективність датчиків для багатьох цільових показників; а також потреба в узгодженні конфліктних цілей, таких як енергоефективність, якість стічних вод і відновлення ресурсів [4]. Крім того, існує розрив у впровадженні передових систем цифровізації та автоматизації в промислових масштабах через проблеми інтеграції

апаратного й програмного забезпечення, стандартизації даних і валідації моделей за умов невизначеності або змінних режимів експлуатації.

Огляд останніх досліджень підкреслює швидку еволюцію як апаратних, так і програмних платформ для моніторингу та контролю біопроцесів у водоочищенні та екологічній біотехнології. Глобальне впровадження передових сенсорних мереж, технологій аналітичного контролю процесів (PAT) та платформ автоматизації процесів, таких як Biobrain® Supervise (Sartorius), Lucullus® (Securecell) та TruBio (Thermo Fisher), прискорює перехід від ручного контролю якості до моніторингу процесів у режимі реального часу на основі моделей та їх постійної оптимізації. Ці інтегровані системи сприяють надійному збиранню даних з різних джерел, забезпечують комплексну візуалізацію динаміки процесів та підтримують передові стратегії контролю [5].

Важливою сферою інновацій є поширення технологій вбудованих, онлайн- та приладових датчиків для моніторингу біореакторів та водоочищення. Оптичні, електрохімічні та спектроскопічні датчики тепер регулярно забезпечують вимірювання в режимі реального часу параметрів, критичних для ефективності біопроцесів та якості стічних вод: рН, розчинений кисень, окисно-відновний потенціал (ORP), температура, загальна кількість завислих речовин, концентрація біогенних речовин (NH_4^+ , NO_3^- , PO_4^{3-}), хімічне споживання кисню (COD) та нові забруднювачі, такі як мікропластик та мікроелементи. Інновації включають мініатюрні оптичні датчики на основі флуоресценції для DO/pH, ємнісні та акустичні зонди для біомаси, вдосконалені ферментативні та біосенсори для метаболітів і токсинів, а також аналітичні системи, що забезпечують моніторинг BOD/COD в режимі реального часу з мінімальним обслуговуванням.

Технології штучного інтелекту (AI) та машинного навчання (ML) зараз відіграють центральну роль як у моніторингу, так і в контролі, особливо в таких завданнях, як інтерпретація спектральних даних, розпізнавання аналітичних шаблонів, виявлення аномалій, «м'яке» зондування змінних, що не піддаються прямому вимірюванню, превентивне технічне обслуговування та адаптивна оптимізація систем. Такі методи, як штучні нейронні мережі (ANN), гібридні підходи, такі як ANFIS і LSTM, досягли значних успіхів у прогнозуванні точності, ефективності обробки та контролю показників.

Методологія досліджень для моніторингу та оцінки систем контролю включає: вибір цільового процесу або реактору; встановлення датчиків та платформи даних; побудова моделей; розробка та впровадження алгоритмів управління; оцінка управління в замкнутому циклі; оцінка за ключовими показниками ефективності; перевірка моделей та алгоритмів.

Основним завданням досліджень у сфері моніторингу та контролю біопроцесів є розробка, апробація та впровадження систем, які можуть:

- Забезпечувати високочастотні, точні та надійні вимірювання всіх відповідних параметрів процесу та змінних стану в режимі реального часу або майже в режимі реального часу, з мінімальним технічним обслуговуванням та ризиком відмови або забруднення.

- Автоматично підтримувати або оптимізувати біопроцес у межах визначених проектних параметрів, досягаючи стабільності, якості продукції, ефективності використання ресурсів та відповідності нормативним вимогам, навіть за динамічно мінливих умов та непередбачених збурень.

- Адаптуватися до мінливих операційних стратегій, таких як інтеграція повторного використання ресурсів (наприклад, енергії, біогенних речовин, повторного використання води).

- Зниження експлуатаційних витрат, споживання енергії та впливу на навколишнє середовище (наприклад, шляхом мінімізації використання надмірної аерації або хімікатів).

Це вимагає узгодженої інтеграції апаратного забезпечення датчиків, програмного забезпечення для автоматизації, моделей процесів (механічних, заснованих на даних, гібридних) та платформ штучного інтелекту/аналітики, що забезпечує взаємодію (часто за допомогою OPC UA та хмарних сховищ даних), кібербезпеку та можливість постійного вдосконалення за допомогою цифрової трансформації (Bioprocessing 4.0).

Результати досліджень, демонструють ефективність та трансформаційний вплив сучасних систем моніторингу та автоматичного контролю в біопроцесах:

1. Моніторинг та контроль в системах з активним мулом та MBR:

- Застосування контролерів прогнозування вихідних даних (Output MPC) у реальних та модельованих системах очищення стічних вод активним мулом (ASP) забезпечило значне поліпшення якості стічних вод, стабільності роботи та відновлення енергії/ресурсів у порівнянні з традиційним або відкритим контуром управління [6]. У сценаріях пікових навантажень ці MPC забезпечили дотримання нормативних вимог щодо азоту, зберігаючи при цьому оптимальний баланс витрат та енергії, продемонструвавши гнучкість у збалансуванні суперечливих цілей.

- Мембранні біореактори (MBR): Системи моніторингу та контролю на основі штучного інтелекту, продемонстрували ефективність у мінімізації забруднення мембран, підтримці високого рівня видалення біогенних речовин (>98% для азоту та фосфору) та підтримці якості стічних вод у межах граничних значень навіть за мінливих характеристик вхідних стічних вод [3]. Використання моніторингу трансмембранного тиску та розчинних мікробних продуктів у реальному часі, реалізованого за допомогою передових спектроскопічних та багато сенсорних аналітичних методів, сприяє превентивному технічному обслуговуванню та оптимальним циклам очищення, скорочуючи час простою та споживання енергії.

2. Цифровізація, Індустрія 4.0 та інтеграція Bioprocessing 4.0: швидка еволюція програмного забезпечення платформ (SCADA, DCS, хмарна аналітика) та незалежних від постачальників інтерфейсів дозволила забезпечити безперебійне з'єднання між датчиками РАР, PLC, програмною аналітикою та хмарними інформаційними панелями. Ці системи підтримують моніторинг декількох реакторів (32+ одиниці), електронний запис партій та можливість аудиту відповідно до стандартів GMP, 21 CFR Part 11 та EU Annex 11, що дозволяє швидко та масштабно розгортати їх від лабораторного/пілотного до повного комерційного виробництва.

Тим не менш, залишаються невирішені проблеми: забезпечення надійності та придатності моделей AI/ML для різних масштабів і об'єктів, стандартизація інфраструктури даних для забезпечення сумісності, перевірка гібридних моделей на відповідність нормативним вимогам, а також збалансування таких суперечливих цілей, як стабільність, вартість, енергоефективність та повторне використання ресурсів. Критичні області для майбутніх досліджень включають:

- Розробка датчиків, що не потребують клопіткого обслуговування та працюють у режимі реального часу, особливо для нових мікро- забруднювачів та мікробних/вірусних патогенів, інтегрованих з адаптивною, самодіагностичною аналітикою.

- Повномасштабне впровадження та порівняльний аналіз цифрових двійників та хмарних систем управління зі штучним інтелектом, з особливою увагою до кібербезпеки, конфіденційності даних та розуміння логіки прийняття рішень.

- Інтеграція комплексної оптимізації в режимі реального часу, що охоплює стабільність процесів, якість стічних вод, використання енергії та досягнення цілей циркулярної економіки.

- Міждисциплінарне навчання та нарощування потенціалу, забезпечення майбутніх фахівців, інженерів, необхідними вміннями для проектування, впровадження та аудиту цих систем у різних реальних сценаріях.

Таким чином, траєкторія моніторингу та контролю біопроцесів полягає у підвищенні рівня інтелекту, автоматизації та надійності, що дозволяє не тільки дотримуватися екологічних вимог та зменшити експлуатаційні витрати, але й перейти до сталого, ресурсоефективного здійснення біологічних процесів та управління ресурсами у швидкозмінному світі.

1. Rathore AS, Mishra S, Nikita S, Priyanka P. Bioprocess Control: Current Progress and Future Perspectives. *Life*. 2021; 11(6):557. <https://doi.org/10.3390/life11060557>.

2. Sharma, D., Singh, K. AI-enhanced bioprocess technologies: machine learning implementations from upstream to downstream operations. *World J Microbiol Biotechnol* 41, 278, 2025. <https://doi.org/10.1007/s11274-025-04494-5>.

3. Xu M, Liu D. AI-Enabled Membrane Bioreactors: A Review of Control Architectures and Operating-Parameter Optimization for Nitrogen and Phosphorus Removal. *Water*. 2025; 17(19):2899. <https://doi.org/10.3390/w17192899>.

4. Lyubenova V, Ignatova M, Zoteva D, Roeva O. Model-Based Adaptive Control of Bioreactors—A Brief Review. *Mathematics*. 2024; 12(14):2205. <https://doi.org/10.3390/math12142205>.

5. Butean A, Cutean I, Barbero R, Enriquez J, Matei A. A Review of Artificial Intelligence Applications for Biorefineries and Bioprocessing: From Data-Driven Processes to Optimization Strategies and Real-Time Control. *Processes*. 2025; 13(8):2544. <https://doi.org/10.3390/pr13082544>.

6. Otacilio B.L. Neto, Michela Mulas, Francesco Corona. A model-based framework for controlling activated sludge plants, *Chemical Engineering Journal*, Volume 488, 2024, 150750, ISSN 1385-8947, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.150750>.

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ОЧИЩЕННЯ ВОДИ ВІД ІОНІВ ЗАЛІЗА ТА МАРГАНЦЮ З ВИКОРИСТАННЯМ МАГНЕТИТУ

Вікторія ДЕРМЕНЖИ, Микола ГОМЕЛЯ

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»*

пр. Берестейський, 37, м. Київ 03056, Україна

e-mail: whiskas7otoo@gmail.com

Наявність заліза та марганцю у воді спричиняє переважно естетичні та експлуатаційні проблеми. Залізо забарвлює воду в жовтуватий або бурий колір і додає металевого присмаку. При його окисленні утворюється осад гідроксиду заліза. Марганець, у свою чергу, призводить до утворення темного осаду та плям на сантехніці [1, 2]. Крім того, підвищені концентрації заліза і марганцю сприяють розвитку залізо- та марганцеокислювальних бактерій, які утворюють слизові біоплівки в трубах і фільтрах, знижуючи пропускну здатність систем водопостачання [3]. В Україні гранично допустимі концентрації (ГДК) заліза та марганцю у питній воді регламентуються ДСанПіН 2.2.4-171-10. Для централізованих джерел постачання допустимий рівень заліза складає 0,2 мг/дм³, а марганцю — 0,05 мг/дм³ [4]. Для води з колодязів і каптажів допускається більше: до 1,0 мг/дм³ Fe і до 0,5 мг/дм³ Mn.

Метою нашої роботи було визначення ефективності очищення води від іонів заліза та марганцю за умов інтенсивності їх аерації при кімнатній температурі з подальшим фільтруванням на насипному фільтрі.