

Дичко А.О.

Національний транспортний університет

Салюк А.І.

Національний університет харчових технологій

Мінаєва Ю.Ю.

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

ІНТЕЛЕКТУАЛІЗАЦІЯ МОНІТОРИНГУ ФУНКЦІОНУВАННЯ СТАНЦІЙ БІОХІМІЧНОГО ОЧИЩЕННЯ СТІЧНИХ ВОД

У статті розглянуто потенціал використання штучного інтелекту та машинного навчання у сфері очищення стічних вод. Визначено основні переваги, архітектурні обмеження нейронних мереж, технічні виклики, а також перспективи впровадження новітніх інтелектуальних систем. Окрема увага приділена ролі інтелектуалізації процесу моніторингу у прогнозуванні якості води, управлінні процесами та енергоефективності. Зазначено, що для ефективного функціонування станцій з біохімічного очищення стічних вод важливим є моніторинг показників якості очищення води на всіх стадіях очищення, а також таких характеристик технологічного процесу, як енергоефективність обладнання, умови повітряного середовища або мікроклімат в приміщенні станції (освітленість, вологість тощо). Крім того, наявність у повітрі приміщення станції певних хімічних речовин – метаболітів біотрансформації органічних речовин у воді та зміни їх концентрацій можуть свідчити про нормальний перебіг або порушення технологічного процесу.

Доведено, що сучасні автоматизовані системи моніторингу забезпечують вищу функціональність та зручність у порівнянні з традиційними ручними методами керування виробничими умовами станцій. Розроблено архітектуру програмно-апаратної системи з модульною структурою, що включає підсистеми збору даних, керування та комунікації. Результатом запропонованої системи є її здатність адаптивно реагувати на зміни параметрів мікроклімату та підтримувати комфортні умови в приміщенні.

Вибір контролерів, датчиків та комунікаційної системи має базуватись на поєднанні бездротової комунікації, високої обчислювальної здатності, енергоефективності та зручності у розробці. Це дозволяє обрати найкраще рішення для реалізації гнучкої, масштабованої та цифрової інтелектуальної системи моніторингу ключових параметрів і керування мікрокліматом у приміщенні станції біохімічного очищення стічних вод.

Ключові слова: екологічна безпека, моніторинг, діджиталізація, біохімічне очищення, стічні води, мікроклімат.

Постановка проблеми. Моніторинг показників ефективності функціонування станцій і обладнання з біохімічного очищення стічних вод є ключовим при управлінні процесом, досягненні необхідного ступеня очищення стоків та підвищенні рівня екологічної безпеки водних ресурсів. Сучасна діджиталізація моніторингу дозволяє перетворити традиційні методи спостереження та контролю даних на цифрові, що включає використання сучасних технологій, таких як Інтернет речей (IoT), аналітика даних, штучний інтелект (ШІ) та хмарні платформи. Це дозволяє отримувати дані в реальному часі, автоматизувати процеси, приймати обґрунтовані управлінські

рішення та підвищувати ефективність у різних сферах, у тому числі біохімічного очищення стічних вод.

Швидкий розвиток технологій штучного інтелекту та машинного навчання створює нові можливості для сталого розвитку та екологічної безпеки, зокрема в галузі екологічного моніторингу та управління водними ресурсами. В умовах циркулярної економіки інтелектуальні системи дозволяють значно підвищити ефективність обробки стічних вод, оптимізуючи процеси за допомогою аналізу великих обсягів даних. Крім того, функціонування складних технічних систем характеризується проблемою невизначеності, тобто відсут-

ністю даних моніторингу у певний момент часу в певній точці технологічного процесу [1-2].

Аналіз існуючих підходів інтелектуалізації моніторингу та управління станціями очищення стічних вод. Алгоритми ШІ сприяють розвитку інтелектуального управління процесами та аналізу даних, що підтримує енергоефективність та циркулярність виробництва [3-5]. У водочистці ці технології дозволяють прогнозувати параметри якості води та моделювати складні процеси, використовуючи штучні нейронні мережі, нечіткі системи, метод опорних векторів тощо [3].

У практиці очищення стічних вод ШІ застосовується з метою автоматизації процесу, зменшення капітальних та операційних витрат, а також підвищення якості процесів обробки.

Мережі довготривалої пам'яті (LSTM) ефективно ідентифікують джерела забруднення, моделюють потоки та прогнозують затримки у системах очищення. Такі системи використовуються для аналізу часових рядів та прогнозування ключових показників якості води [6].

Інші методи, такі як програмування генетичних алгоритмів і моделювання Монте-Карло, застосовуються для оцінки невизначеності, чутливості параметрів та взаємозв'язків між процесами очищення [7].

До інноваційних рішень у сфері ШІ належать:

- експертні системи [8];
- нечітка логіка [9];
- нейро-нечіткі системи [10];
- системи на основі баз знань [11];
- розпізнавання образів, ройовий інтелект, генетичні алгоритми, навчання з підкріпленням та гібридні рішення тощо.

Ці системи покращують управління процесами, забезпечують прогнозування якості води та сприяють підвищенню ефективності очисних споруд.

У зазначених системах керування процесом очищення стічних вод увага приділяється насамперед моніторингу показників якості води на всіх етапах її обробки [12, 13]. Проте важливими є також показники функціонування станції з водочищення в цілому, які пов'язані як з процесами біотрансформації органічних речовин у воді, так і з такими характеристиками, як енергоефективність обладнання, умови повітряного середовища або мікроклімат в приміщенні станції (освітленість, вологість тощо). Крім того, наявність у повітрі приміщення станції певних хімічних речовин та зміни їх концентрацій можуть свідчити про нормальний перебіг або порушення технологічного процесу.

Одним із ключових аспектів керування станцією є підвищення енергоефективності систем. Алгоритми керування, розроблені з урахуванням енергозбереження, дають змогу знизити витрати ресурсів до 30% без зменшення рівня ефективності функціонування очисних споруд. Адаптивні алгоритми управління забезпечують до 50% економії енергоресурсів [14], а ефективне керування системами HVAC дозволяє зменшити енергоспоживання на 40% порівняно зі стандартними технологіями [15]. Це сприяє оптимізації витрат і мінімізує надмірне використання ресурсів.

Проблема енергозбереження є актуальною у всьому світі, особливо в контексті підвищення тарифів, глобального потепління та зростання енергоспоживання. Особливої уваги потребує підвищення енергоефективності будівель очисних споруд, де мікроклімат впливає на біохімічні процеси (зокрема, аеробні) і витрати енергії. Дослідження вказують на необхідність впровадження сучасних систем керування виробничим середовищем, вентиляцією та кондиціонуванням, зокрема алгоритмів прогнозування, адаптивного управління та штучного інтелекту. Проте залишаються проблеми, пов'язані з вибором оптимальних методів, високою обчислювальною складністю та недостатнім урахуванням таких параметрів, як температура зовнішнього середовища.

Інтеграція інтелектуальних датчиків, хмарних обчислень та мобільних додатків значно підвищує ефективність управління мікрокліматом у приміщеннях. Використання IoT-рішень забезпечує централізований контроль кліматичних параметрів у великих будівлях, передавання даних на віддалені сервери та гнучке налаштування роботи систем відповідно до потреб користувачів. Сучасні тенденції автоматизованого регулювання умов повітряного середовища приміщень свідчать про перехід від ручного керування кліматичними параметрами до повністю автоматизованих систем, що базуються на обробці великих масивів даних, прогнозуванні та адаптивному управлінні. Інтелектуальні системи аналізують споживання енергії та коригують параметри в реальному часі [16]. Перспективні напрями подальших досліджень охоплюють вдосконалення алгоритмів штучного інтелекту для аналізу кліматичних даних, інтеграцію енергоощадних технологій та розширення можливостей IoT-систем для ефективного контролю мікроклімату у приміщеннях.

Безпека даних є важливим аспектом у розробці сучасних систем управління мікрокліматом. Для запобігання кібератакам використовуються бага-

торівнева автентифікація та шифрування даних, що мінімізує ризики несанкціонованого доступу [17]. Оскільки передача інформації часто здійснюється через бездротові мережі, необхідно впроваджувати технології захисту персональних даних та запобігання зовнішньому втручанню. Наукові праці у цій галузі розглядають методи кібербезпеки для IoT-пристроїв, наголошуючи на необхідності регулярного оновлення програмного забезпечення для усунення потенційних вразливостей.

Метою статті є розробка системи моніторингу показників регламентованих умов функціонування станції з біохімічного очищення стічних вод.

Автоматизована система моніторингу виробничого середовища станції водоочищення. Особливістю застосування системи автоматичного керування мікрокліматом є забезпечення регламентованих умов у приміщенні станції водоочищення шляхом моніторингу та регулювання температури, вологості, рівня CO₂, вмісту у повітрі певних речовин-метаболітів біохімічного процесу очищення стоків, а також врахування рівня освітленості та енергозбереження станції. Особливістю даної архітектури є не лише локальна автоматизація, а й інтеграція з хмарними сервісами та можливість віддаленого управління через веб-інтерфейс. Така система має забезпечити гнучке, автономне та віддалено кероване рішення, яке може адаптуватися до зміни умов середовища, часу доби та сценаріїв використання приміщення

станції. Функціональна система складається з трьох основних підсистем (рис. 1):

- підсистема збору даних – включає датчики температури, вологості, CO₂, концентрації метаболітів, освітленості тощо;
- підсистема керування – контролює виконавчі пристрої (реле для вентилятора, нагрівача, зволожувача);
- комунікаційна підсистема – забезпечує віддалений моніторинг та керування через Wi-Fi, MQTT-брокер і веб-інтерфейс.

Дана архітектура є гнучкою та розширюваною, передбачена можливість додавання нових сценаріїв (наприклад, нічний режим або економія енергії) та модулів (керування LED-освітленням, додаткові датчики тощо).

У якості головного контролера обрано ESP32 – мікроконтролер із підтримкою Wi-Fi та Bluetooth (рис. 2), достатньою кількістю GPIO-портів, які полегшують підключення та керування зовнішніми пристроями та датчиками та високою продуктивністю для обробки декількох сенсорів і керування пристроями [18].

Усі сенсори з'єднані з ESP32 безпосередньо через цифрові порти або інтерфейс I2C. ESP32 обробляє отримані дані, приймає рішення згідно із закладеною логікою (порогові значення температури, вологості, CO₂), і керує відповідними виконавчими пристроями.

Таким чином, ESP32 здійснює наступні етапи моніторингу:

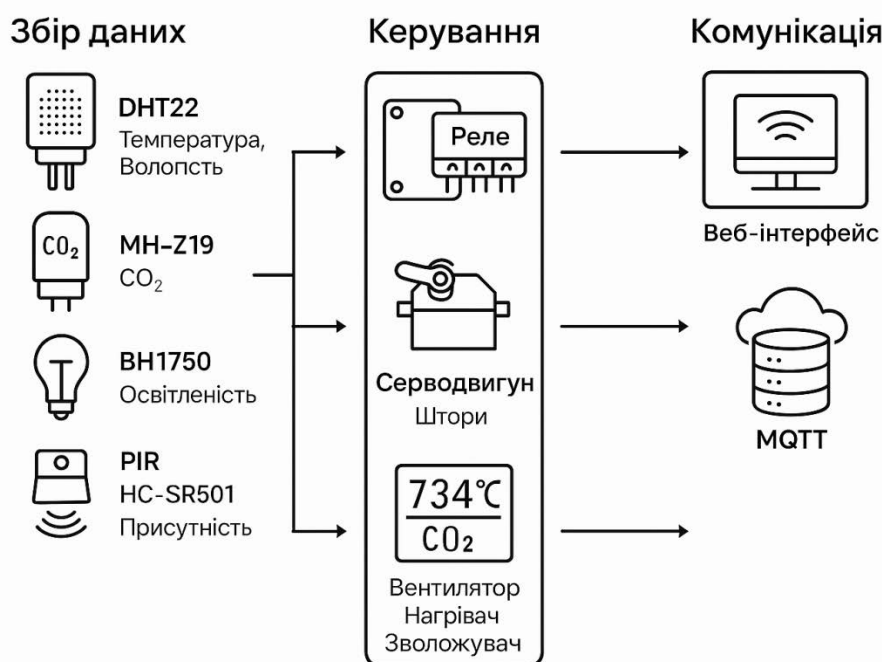


Рис. 1. Функціонал системи моніторингу мікроклімату станції

– передає дані на MQTT-брокер, де вони можуть бути використані для віддаленого моніторингу або візуалізації;

– відкриває веб-інтерфейс через вбудований WebServer для ручного керування параметрами системи;

– виводить актуальні дані на OLED-дисплей.

Використання MQTT-протоколу дозволяє інтегрувати систему з хмарними платформами або мобільними додатками, забезпечуючи високу масштабованість та зручність моніторингу.

У розробці інтелектуальних систем керування мікрокліматом важливою є наявність потужного, надійного та функціонально насиченого мікроконтролера, який дозволяє інтегрувати в систему велику кількість сенсорів і виконавчих пристроїв, підтримує різні протоколи обміну даними, а також забезпечує зв'язок із хмарними сервісами або інтерфейсами користувача. Вибір ESP32 як центрального елемента системи ґрунтується на наступному:

1. Вбудований модуль Wi-Fi та Bluetooth дозволяє реалізувати як локальну, так і глобальну (через інтернет) комунікацію, підключення до домашньої мережі, публікація даних на MQTT-брокері або в хмарі (Blynk, Firebase, etc.); Віддалене керування системою через веб-інтерфейс або мобільний додаток; Bluetooth (BLE) – може використовуватися для швидкої ініціалізації пристрою, з'єднання зі смартфоном або іншими BLE-пристроями (напр. браслетами присутності, сенсорами тощо).

2. ESP32 має до 34 GPIO-портів, які можуть бути використані для підключення аналогових

і цифрових датчиків, управління реле, сервомеханізмами, світло діодами, зчитування сигналів від PIR-сенсорів, датчиків CO₂, BH1750 та інших, що дозволяє під'єднати кілька пристроїв одночасно, без потреби у додаткових мультиплексорах чи розширювачах портів (як у Arduino Uno) [19].

3. ESP32 підтримує багато інтерфейсів, що критично важливо для взаємодії з різними сенсорами та модулями для зв'язку: I2C (OLED-дисплей, BH1750, BME280); UART (MH-Z19B (CO₂), модулі GPS або LoRa); SPI (Швидкі дисплеї, карти пам'яті); PWM (Керування яскравістю LED, положенням сервомоторів).

4. ESP32 підтримує кілька енергозберігаючих режимів, наприклад: Light Sleep / Deep Sleep – дозволяє суттєво зменшити споживання енергії при роботі від акумулятора або в енергозалежному середовищі, ідеально підходить для систем, які працюють циклічно (наприклад, замір параметрів раз на 5 хвилин, передача – потім сон) [20].

5. Висока обчислювальна потужність за рахунок двоядерного процесору Xtensa LX6 до 240 МГц; До 520 КБ RAM, можливість роботи з великими масивами даних; Дозволяє паралельно виконувати обробку даних із сенсорів, вивід інформації на дисплей, публікацію в MQTT, відповідь на HTTP-запити (веб-інтерфейс).

6. ESP32 сумісний із платформами: Home Assistant, Node-RED, OpenHAB, Blynk / ESPHome [21].

Завдяки поєднанню бездротових можливостей, обчислювальної потужності, енергоефективності та простоти в розробці, ESP32 є оптимальним



Рис. 2. Апаратні компоненти, з'єднані з ESP32

вибором для створення гнучкої, масштабованої, діджиталізованої інтелектуальної системи моніторингу ключових показників і керування мікрокліматом приміщення станції з біохімічного очищення стічних вод.

Висновки. Інтелектуалізація моніторингу функціонування станцій біохімічного очищення стічних вод має значний потенціал у сфері очищення стічних вод. Системи штучного інтелекту та машинного навчання дозволяють підвищити ефек-

тивність очищення води, точність прогнозів, автоматизувати складні процеси та підвищити рівень екологічної безпеки водних ресурсів. Водночас існують обмеження, пов'язані з вартістю, обчислювальними ресурсами та складністю впровадження. Подальші дослідження мають бути зосереджені на спрощенні архітектури нейромереж, підвищенні прозорості моделей та розробці енергоефективних алгоритмів моніторингу та управління станціями з біохімічного очищення стічних вод.

Список літератури:

1. Dychko A., Yeremeyev I., Remez N., Kraychuk S., Ostapchuk N. Structural redundancy as robustness assurance of complex geoengineering systems. In *E3S Web of Conferences*. 2020, 166. 11003. 10.1051/e3sconf/202016611003
2. Yeremeyev I., Dychko A., Remez N., Kraychuk S., Ostapchuk N. (). Problems of sustainable development of ecosystems. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021, 628, 1. 012014. 10.1088/1755-1315/628/1/012014
3. Ganthavee V., Trzcinski, A.P. Artificial intelligence and machine learning for the optimization of pharmaceutical wastewater treatment systems: a review. *Environ Chem Lett*. 2024, 22, 2293–2318. 10.1007/s10311-024-01748-w
4. Matheri A., Mohamed B., Ntuli F., Nabadda E., Ngila J. Sustainable circularity and intelligent data-driven operations and control of the wastewater treatment plant. *Phys Chem Earth Parts a/b/c*. 2022. 126. 103152. 10.1016/j.pce.2022.103152
5. Osman A., Nasr M., Farghali M., Bakr S., Eltaweil A., Rashwan A., Abd El-Monaem E. Machine learning for membrane design in energy production, gas separation, and water treatment: a review. *Environ Chem Lett*. 2024, 22. 505–560. 10.1007/s10311-023-01695-y
6. Wang P., Yao J., Wang G., Hao F., Shrestha S., Xue B., Xie G., Peng Y. Exploring the application of artificial intelligence technology for identification of water pollution characteristics and tracing the source of water quality pollutants. *Sci Total Environ*. 2019. 693. 133440. 10.1016/j.scitotenv.2019.07.246
7. Aghdam E., Mohandes S., Manu P., Cheung C., Yunusa-Kaltungo A., Zayed T. Predicting quality parameters of wastewater treatment plants using artificial intelligence techniques. *J Clean Prod*. 2023. 405. 137019. 10.1016/j.jclepro.2023.137019
8. Wu X., Wang Y., Wang C., Wang W., Dong F. Moving average convergence and divergence indexes based online intelligent expert diagnosis system for anaerobic wastewater treatment process. *Bioresour Technol*. 2021. 324. 124662. 10.1016/j.biortech.2020.124662
9. Mazhar S., Ditta A., Bulgariu L., Ahmad I., Ahmed M., Nadiri A. Sequential treatment of paper and pulp industrial wastewater: prediction of water quality parameters by Mamdani Fuzzy Logic model and phytotoxicity assessment. *Chemosphere*. 2019. 227. 256–268. 10.1016/j.chemosphere.2019.04.022
10. Nam S-N., Yea Y., Park S., Park C., Heo J., Jang M., Park C., Yoon Y. Modeling sulfamethoxazole removal by pump-less in-series forward osmosis-ultrafiltration hybrid processes using artificial neural network, adaptive neuro-fuzzy inference system, and support vector machine. *Chem Eng J*. 2023. 10.1016/j.cej.2023.145821
11. Liu Y., Ramin P., Flores-Alsina X., Gernaey K. Transforming data into actionable knowledge for fault detection, diagnosis and prognosis in urban wastewater systems with AI techniques: a mini-review. *Process Saf Environ Prot*. 2023. 172. 501–512. 10.1016/j.psep.2023.02.043
12. Dai W., Pang J., Ding J. et al. Integrated real-time intelligent control for wastewater treatment plants: Data-driven modeling for enhanced prediction and regulatory strategies. *Water Research*. 2025. 274. 123099. 10.1016/j.watres.2025.123099
13. Shen Y. et al. A Deep-Learning-Based Data-Management Scheme for Intelligent Control of Wastewater Treatment Processes Under Resource-Constrained IoT Systems. *IEEE Internet of Things Journal*. 2024. 11, 15. 25757-25770. 10.1109/JIOT.2024.3388043
14. Ефективність систем автоматизації для інтелектуальних будівель. Smart Building Solutions [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://smartbuildingsolutions.com> – заголовок з екрану
15. Дяченко В. Інтелектуальні підходи енергозбереження у безпроводних сенсорних комп'ютерних мережах. *Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць*, 2020, 4.62. 114-118. 10.26906/SUNZ.2020.4.114

16. Строкань О.В. Система автоматизованої підтримки оптимального мікроклімату виробничого приміщення. *Системи обробки інформації*. 2014, 5. 97-100.
17. Яковів І. Базова модель інформаційних процесів та поведінки системи кіберзахисту. *Information Technology and Security*. 2019, 7, 2 (13). 183–196.
18. Hercog D. et al. Design and implementation of ESP32-based IoT devices. *Sensors*. 2023, 23.15: 6739.
19. Розуміння відмінностей ESP32 та ESP32-S3 Технічний аналіз та ефективність роботи [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://ua.ariat-tech.com/blog/understanding-the-differences-esp32-and-esp32-s3-technical-and-performance-analysis.html> – заголовок з екрану.
20. Інтернет речей та вбудовані системи. Лабораторний практикум [Електронний ресурс] : навч. посіб. для здобувачів ступеня магістра за освіт. програмами «Інтелектуальні сервіс-орієнтовані розподілені обчислювання» та «Комп'ютерні науки» спец. 122 «Комп'ютерні науки» / КПП ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: Є. В. Вербицький, Б. А. Кирюша, В. Ш. Гіоргізова-Гай. – Електронні текстові дані (1 файл: 2,82 Мбайт). – Київ: КПП ім. Ігоря Сікорського, 2024. – 123 с.
21. Rahaman Md H., Iqbal T. A remote thermostat control and temperature monitoring system of a single-family house using openHAB and MQTT. *European Journal of Electrical Engineering & Computer Science*. 2020, 4, 5.

Dychko A.O., Salyuk A.I., Minaieva Yu.Yu. INTELLECTUALIZATION OF MONITORING THE FUNCTIONING OF BIOCHEMICAL WASTEWATER TREATMENT PLANTS

The article considers the potential of using artificial intelligence and machine learning in the field of waste water treatment. The main advantages, architectural limitations of neural networks, technical challenges, as well as the prospects for implementing the latest intelligent systems are identified. Special attention is paid to the role of intellectualization of the monitoring process in predicting water quality, process management and energy efficiency. It is noted that for the effective functioning of biochemical waste water treatment plants, it is important to monitor water treatment quality indicators at all stages of treatment, as well as such characteristics of the technological process as energy efficiency of equipment, air conditions or microclimate in the plant premises (lighting, humidity, etc.). In addition, the presence in the air of the plant premises of certain chemicals – metabolites of biotransformation of organic substances in water and changes in their concentrations may indicate the normal course or disruption of the technological process.

It is proven that modern automated monitoring systems provide higher functionality and convenience compared to traditional manual methods of controlling the production conditions of plants. The architecture of the software and hardware system with a modular structure is developed, which includes data acquisition, control and communication subsystems. The result of the proposed system is its ability to adaptively respond to changes in microclimate parameters and maintain comfortable conditions in the plant.

The choice of controllers, sensors and communication system should be based on a combination of wireless communication, high computing power, energy efficiency and ease of development. This allows to choose the best solution for implementing a flexible, scalable and digital intelligent system for monitoring key parameters and controlling the microclimate in the premises of a biochemical wastewater treatment plant.

Key words: *environmental safety, monitoring, digitalization, biochemical treatment, wastewater, microclimate.*

Дата надходження статті: 24.09.2025

Дата прийняття статті: 10.10.2025

Опубліковано: 16.12.2025