

Інформаційна система ідентифікації домішкових компонентів важких металів у рідких середовищах

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.040>

Андрій Сафоник

Національний університет водного господарства
та природокористування
м. Рівне, Україна

a.p.safonyk@nuwm.edu.ua

Сергій Полухович

Національний університет водного господарства
та природокористування
м. Рівне, Україна

s.o.polyukhovych@nuwm.edu.ua

Юрій Ковальчук

Національний університет водного господарства
та природокористування
м. Рівне, Україна

yu.t.kovalchuk@nuwm.edu.ua

Анотація—У роботі представлено концепцію та результати розробки інформаційно-вимірювальної системи для ідентифікації домішкових компонентів, зокрема важких металів, у водних середовищах. Запропонована система реалізує принцип автоматизованого контролю концентрацій забруднювальних речовин із використанням оптоелектронних сенсорів і мікропроцесорного блока обробки сигналів. Наведено структурну схему системи, описано алгоритми реєстрації та цифрової обробки оптичних сигналів. Проведено експериментальні дослідження з використанням синтезованих сорбентів на основі кремнезему, модифікованого реагентами, що підвищують селективність визначення іонів Fe(II), Fe(III) та I₂. Отримані результати підтверджують ефективність застосування розробленої системи для моніторингу якості води та створюють передумови для її подальшої автоматизації та впровадження у польових вимірювальних комплексах.

Ключові слова — інформаційно-вимірювальна система; важкі метали; водне середовище; сорбційний метод; спектрофотометрія; оптичні сенсори; мікроконтролер STM32; аналітичний сигнал; калібрування; екологічний моніторинг.

I. ВСТУП

Моніторинг вмісту важких металів у водному середовищі є важливою складовою екологічного контролю, оскільки ці елементи, навіть у незначних концентраціях, можуть чинити токсичний вплив на живі організми та порушувати природний баланс екосистем. Необхідність отримання достовірних і оперативних даних щодо концентрацій домішкових компонентів зумовлює потребу у вдосконаленні аналітичних методів контролю. Одним із сучасних і високочутливих методів визначення важких металів у рідких середовищах є твердофазна спектрофотометрія, яка базується на адсорбції аналіту на твердій фазі з подальшим оптичним

вимірюванням. Застосування цього методу дає змогу підвищити точність аналізу, зменшити вплив сторонніх факторів і скоротити тривалість пробопідготовки [6, 7].

З метою підвищення ефективності моніторингу та автоматизації оброблення результатів досліджень розроблено інформаційну систему ідентифікації домішкових компонент у рідких середовищах. Вона забезпечує збереження, систематизацію та візуалізацію експериментальних даних, а також сприяє підвищенню оперативності прийняття рішень у сфері екологічного контролю. Поєднання твердофазної спектрофотометрії з інформаційними технологіями створює основу для формування ефективної системи моніторингу стану водних об'єктів і своєчасного виявлення небезпечних забруднень.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Основною метою даної роботи є розроблення та експериментальна перевірка інформаційно-вимірювальної системи для ідентифікації домішкових компонентів важких металів у водних середовищах шляхом поєднання сорбційного концентрування з оптичним детектуванням [1, 2].

Об'єктом дослідження є іони важких металів Fe²⁺, Fe³⁺ та I₂, адсорбовані на поверхні кремнезему, модифікованого різними реагентами. Вибір саме цих елементів обумовлений їхньою поширеністю у промислових стічних водах та високою токсичністю навіть при низьких концентраціях. Для підвищення селективності та чутливості аналізу використано сорбційний підхід, що передбачає попереднє концентрування металів на поверхні функціоналізованого сорбенту типу SiO₂–полігексометилenguанідин (ПГМГ)–реагент. Синтез сорбенту здійснювався у кілька етапів: активація поверхні кремнезему, нанесення реагенту та стабілізація отриманого покриття [3].

Ідентифікація та кількісне визначення металів проводились за допомогою твердофазної спектрофотометрії. Суть методу полягає у вимірюванні коефіцієнта відбиття світлового потоку від поверхні сорбенту після утворення кольорового комплексного з'єднання між іоном металу та специфічним реагентом. Наприклад, взаємодія іонів Fe^{2+} з батофенантроліном призводить до утворення інтенсивно забарвленого рожевого комплексу, тоді як Fe^{3+} у присутності нітритро- R -солі дає оранжеве забарвлення, а I_2 – жовто-зелене. Інтенсивність кольору прямо пропорційна концентрації аналіту на поверхні сорбенту, що дозволяє використовувати цей показник як аналітичний сигнал [4, 5].

Для автоматизації процесу вимірювання створено структурну схему (рис.2), до складу якої входять джерело випромінювання (світлодіоди FYL3014 із довжинами хвиль 470–660 нм), фотоприймальний модуль на фотодіоді SFH229, підсилювач сигналу на операційному підсилювачі AD8606, 16-розрядний аналогово-цифровий перетворювач ADS1115 та мікроконтролер серії STM32F0. Система працює у циклічному режимі: світлодіод періодично вмикається і вимикається, що дозволяє мікроконтролеру визначати різницю між сигналом при активному освітленні та фоновим рівнем, компенсуючи вплив зовнішнього освітлення програмно.

Отримані значення оптичного сигналу передаються через інтерфейс USB-UART (на базі CP2102) до комп'ютера, де проводиться їхня обробка, побудова калібрувальних графіків і розрахунок концентрацій. Таким чином, постає завдання створення єдиної інформаційно-вимірювальної системи, що об'єднує апаратну частину (сенсорний модуль, електроніку,

мікропроцесор) та програмну (цифрову фільтрацію, візуалізацію, статистичну обробку даних).

Конструктивно світлодіод і фотодіод виконані в однаковому корпусі з прозорою лінзою, і мають діаметр 3 мм. Оптична схема зображена на рисунку 1.

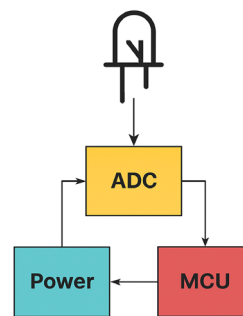


Рис.1. Оптична схема приладу

Два джерела випромінювання (світлодіоди) під кутом освітлюють поверхню зразка. В зоні перетину світлових потоків формується робоча область відбиття, сигнал від якої надходить до фотодіода для подальшого аналізу.

III. ВИРІШЕННЯ ПОСТАВЛЕНОЇ ЗАДАЧІ

Для реалізації поставленої мети була створена експериментальна установка, яка поєднує елементи сорбційної підготовки проб та оптоелектронного аналізу відбитого світлового потоку. Установка реалізує замкнутий цикл вимірювання, що охоплює етапи сорбції, утворення кольорового комплексу, реєстрацію аналітичного сигналу, його цифрову обробку та передачу результатів до персонального комп'ютера.



Рис.2. Структурна схема приладу

На першому етапі виконано синтез і підготовку сорбенту. Як основу було використано кремнезем (SiO_2), поверхня якого активувалася шляхом хімічної обробки, після чого на неї наносився реагент полігексаметиленгуанідин (ПГМГ) з подальшою модифікацією специфічними органічними сполуками. Таке покриття забезпечує формування функціональних груп, здатних до

комплексотворення з іонами металів. Синтезований сорбент SiO_2 -ПГМГ-реагент характеризується високою питомою поверхнею та рівномірним розподілом активних центрів.

Після підготовки сорбенту здійснювався етап сорбційного концентрування. До проб із відомими концентраціями Fe^{2+} , Fe^{3+} та I_2 додавали певну масу

сорбенту ($m = 0,1$ г), перемішували протягом 15 хвилин при контрольованому рН середовища (для Fe^{2+} – 4,5–6; для Fe^{3+} – 3,5–4). Після завершення сорбції розчин відділявся, а на поверхні твердого носія утворювались стійкі забарвлені комплекси: Fe(II) –батофенантролін (рожевий), Fe(III) –нітрозор-сіль (оранжевий), I –7-йод-8-оксихінолін (жовто-зелений). Інтенсивність забарвлення залежала від концентрації металу, що підтверджувалося серією проб із різними вихідними вмістами аналіту.

На другому етапі дослідження було створено оптоелектронну вимірювальну систему, призначену для автоматичного визначення коефіцієнта відбиття R . Для освітлення поверхні сорбенту використовували світлодіоди серії FYL3014 із довжинами хвиль 470, 525, 590 та 660 нм, що відповідають синьому, зеленому, жовтому та червоному спектрам. Як фотоприймач застосовувався фотодіод SFH229 у прозорому корпусі, чутливому до видимого діапазону. Перетворення фотоструму здійснювалося за допомогою операційного підсилювача AD8606, у колі зворотного зв'язку якого встановлено резистор 100 к Ω , що забезпечував коефіцієнт перетворення 100 мВ/1 мкА.

Для високоточного аналого-цифрового перетворення використовувався 16-розрядний АЦП ADS1115 із чотирма каналами, який передавав результати на мікроконтролер серії STM32F0 по інтерфейсу І²С. Мікроконтролер виконував попередню обробку даних, зокрема компенсацію фонові засвіткі. На відміну від традиційних оптичних схем, де застосовується механічне затемнення, запропоновано програмний метод компенсації фону: світлодіод періодично вмикається і вимикається (з періодом 5 с), а мікроконтролер обчислює різницю сигналів, отриманих при обох станах. Це дозволяє повністю виключити вплив зовнішнього освітлення без необхідності екранізації оптичного каналу.

Оброблені цифрові дані передавались до персонального комп'ютера через інтерфейс USB–UART (на базі CP2102), де виконувалася подальша статистична обробка, фільтрація шумів, побудова градуїрованих кривих та збереження результатів у базі даних.

Результати експериментів показали високу лінійність аналітичного сигналу в діапазоні концентрацій від 0,1 до 5 мкг/0,1 г сорбенту. Коефіцієнт кореляції для лінійних апроксимацій перевищував 0,98, що свідчить про відтворюваність вимірювань і стабільність оптичної системи. Зі збільшенням концентрації металу відбувалося зниження коефіцієнта відбиття, що узгоджується з теоретичними уявленнями про зростання поглинання внаслідок формування більш інтенсивно забарвлених комплексів.

Отримані результати підтверджують працездатність технічного рішення й ефективність

поєднання сорбційного концентрування з твердофазною спектрофотометрією.

Висновки

У результаті виконаної роботи розроблено та експериментально перевірено прототип інформаційно-вимірювальної системи, призначеної для ідентифікації домішкових компонентів важких металів у водних середовищах. Система реалізує поєднання сорбційного методу концентрування з оптичним детектуванням аналітичного сигналу, що дозволяє суттєво підвищити чутливість аналізу при мінімальній кількості реагентів.

Запропонована оптоелектронна схема з використанням світлодіодного освітлення та фотодіодного приймача продемонструвала високу стабільність і точність реєстрації відбитого сигналу. Високорозрядний аналого-цифровий перетворювач і мікроконтролер STM32 забезпечили адекватну швидкодію та точність цифрової обробки результатів.

Розроблена методика дозволяє проводити експрес-аналіз водних проб без необхідності складної підготовки зразків, що робить її перспективною для застосування в автоматизованих системах моніторингу якості води. Отримані результати підтверджують ефективність інтеграції сорбційних процесів із цифровими методами оптичного вимірювання та відкривають можливість подальшої модернізації системи — зокрема, шляхом багатоканального аналізу, віддаленої передачі даних і впровадження у складі екологічних сенсорних мереж.

Література

- [1] Крачан, Т. & Ямборак, Р. (2024). Джерела походження сполук алюмінію в питній. Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки. 152-158. 10.32782/tnv-tech.2024.1.18.
- [2] Дудатьєв, І. & Притула, М. & Озменчук, І. (2025). Інформаційно-вимірювальна система визначення концентрації домішок у воді на основі кондуктометричного. Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки. 69-75. 10.32782/tnv-tech.2025.2.7.
- [3] Бедункова, Ольга & Кузнецов, П. (2025). Застосування статичних методів аналізу варіацій концентрацій важких металів у поверхневих водах. Bulletin National University of Water and Environmental Engineering. 4. 3-19. 10.31713/vs420241.
- [4] Krasnopyorova, A.P. & Lebedeva, L.T. & Lonin, Oleksii & Sytnik, O.Y. & Yukhno, Galina. (2019). Сорбційно-селективні властивості природних та синтетичних цеолітів щодо важких металів у рідких середовищах..
- [5] Бедункова, Ольга & Кузнецов, П. (2024). Оцінка впливу на навколишнє середовище аналітичних процедур вимірювання макрокомпонентного складу поверхневих вод. Bulletin National University of Water and Environmental Engineering. 2. 3-15. 10.31713/vs220241.
- [6] Грицюк, Іванна & Safonyk, Andrii. (2021). Розроблення інформаційної системи для спектрофотометричного аналізу. Modeling Control and Information Technologies. 135-136. 10.31713/MCIT.2021.44.
- [7] Safonyk, Andrii. (2016). The numerical-asymptotic solution of spatial model of the aerobic water treatment. SCIREA Journal of Mathematics. 1. 197-209.