

Дмитро Корпильов<sup>1</sup>, Андрій Здобицький<sup>2</sup>, Ольга Мокрицька<sup>3</sup>, Володимир Чернюх<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Кафедра систем автоматизованого проектування, Національний університет “Львівська політехніка”, вул. С. Бандери, Львів, Україна, E-mail: dmytro.v.korpylov@lpnu.ua, ORCID 0009-0009-1300-3335

<sup>2</sup> Кафедра систем автоматизованого проектування, Національний університет “Львівська політехніка”, вул. С. Бандери, Львів, Україна, E-mail: andrii.y.zdobyskyi@lpnu.ua, ORCID 0000-0001-8044-9593

<sup>3</sup> Кафедра систем автоматизованого проектування, Національний університет “Львівська політехніка”, вул. С. Бандери, Львів, Україна, E-mail: olha.v.mokrytska@lpnu.ua, ORCID 0000-0002-2887-9585

<sup>4</sup> ЛМКП Львівводоканал, Керівник відділу екологічного контролю вул. Зелена, Львів, Україна, E-mail: chernyukh.volodymyr@gmail.com

## РОЗРОБКА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ВОДНИХ РЕСУРСІВ

Отримано: Лютий 12, 2025 / Переглянуто: Лютий 26, 2025 / Прийнято: Березень 12, 2025

© Корпильов Д., Здобицький А., Мокрицька О., Чернюх В., 2025

<https://doi.org/>

**Анотація.** У статті представлено розробку спектроскопічної системи моніторингу водних ресурсів із використанням сучасних оптичних сенсорів та мікроконтролерів для автоматизованого моніторингу якості води в реальному часі. Основною метою є створення інтелектуальної системи оцінки стану води, що дозволяє виявляти органічні та неорганічні забруднення за допомогою спектрального аналізу.

Система оснащена спектроскопічним сенсором AS7265x, який функціонує у видимому та ближньому інфрачервоному діапазонах, що дозволяє здійснювати високоточний спектральний аналіз. Додатково інтегровано датчик каламутності DFRobot та водонепроникний температурний давач DS18B20 для підвищення точності вимірювань. Управління та обробка даних здійснюється за допомогою мікроконтролера ESP32, який забезпечує збір інформації, її аналіз та передавання через Wi-Fi, а також збереження даних на SD-карту для подальшої обробки.

Практичне застосування розробленої системи полягає в екологічному моніторингу природних та техногенних водних об'єктів, оцінку ефективності систем фільтрації, а також оперативне виявлення змін у складі води. Інтеграція спектроскопії, сенсорного аналізу та штучного інтелекту створює потужний інструмент для підвищення ефективності та доступності моніторингу водних ресурсів.

**Ключові слова:** спектроскопія, оптичний сенсор, мікроконтролер, спектральний аналіз, екологічний моніторинг, забруднення води, ультразвукове очищення, інтелектуальна система, якість води, водні ресурси.

### Вступ

Проблема якості водних ресурсів залишається однією з ключових у контексті екологічної безпеки, особливо з огляду на зростаючий рівень антропогенного навантаження на довкілля. Збільшення чисельності населення, розвиток промисловості, а також вплив зміни клімату призводять до забруднення водойм, що вимагає постійного контролю їхнього стану. Ефективний моніторинг водних об'єктів є необхідною умовою для своєчасного виявлення небезпечних змін у складі води та прийняття відповідних управлінських рішень.

Традиційні лабораторні методи аналізу, хоча й дають точні результати, мають обмеження, пов'язані з тривалістю проведення досліджень, потребою в спеціалізованому обладнанні та

неможливістю безперервного спостереження. У зв'язку з цим актуальним є пошук технічних рішень, які забезпечують автоматизований контроль якості води в режимі реального часу.

Останні роки характеризуються активним впровадженням оптичних сенсорів, зокрема спектроскопічних, у складі портативних вимірювальних систем. Поєднання таких сенсорів із мікроконтролерами дозволяє створювати автономні пристрої, які можуть працювати в складних умовах без участі оператора. Крім того, застосування алгоритмів машинного навчання дає змогу автоматизувати процес обробки результатів та підвищити точність класифікації типів забруднення.

Мета досліджень полягає в аналізі передумов та розробці інтелектуальної системи для моніторингу стану води, що поєднує спектроскопічні методи аналізу, сучасні сенсорні компоненти та можливості бездротової передачі даних.

### **Огляд сучасних літературних джерел за тематикою публікації**

У науковій літературі досить широко розглядається застосування спектроскопії для аналізу хімічного складу води. Зокрема, роботи [1, 2] демонструють ефективність UV і NIR спектроскопії для виявлення органічних та неорганічних домішок. Ці методи базуються на вимірюванні характерних спектральних смуг поглинання або флуоресценції, які дозволяють ідентифікувати різні типи забруднень.

Сенсори типу AS7265х, які функціонують у видимому та ближньому інфрачервоному діапазонах, все частіше використовуються у портативних рішеннях для екологічного моніторингу. Як показано в дослідженнях [3, 4], такі сенсори можуть ефективно працювати у складі систем на базі мікроконтролерів ESP32, що забезпечують збір, попередню обробку та передачу спектральних даних.

Крім апаратної частини, важливу роль відіграє програмне забезпечення, зокрема застосування алгоритмів машинного навчання. У працях [5] розглянуто можливості використання таких підходів для класифікації спектрів, виявлення аномалій та прогнозування змін у складі води. Це дозволяє підвищити інформативність систем і зменшити вплив людського чинника на інтерпретацію результатів.

Низку публікацій [6–10] присвячено технічним аспектам побудови сенсорних систем: вибору параметрів освітлення, обчисленню оптичної довжини шляху, моделюванню впливу температури та швидкості потоку на результати вимірювань. Окрему увагу приділено самокалібруванню, фільтрації, стабілізації умов вимірювання.

Таким чином, результати попередніх досліджень свідчать про обґрунтованість поєднання спектроскопічних методів з мікроелектронними пристроями та алгоритмами обробки даних для розробки ефективних систем екологічного моніторингу. Такий підхід дозволяє підвищити точність контролю стану водного середовища та своєчасно виявляти потенційні джерела забруднення як природного, так і техногенного походження.

### **Виклад основного матеріалу**

**Значення моніторингу якості води.** Забруднення водних ресурсів спричиняють значні екологічні, економічні та соціальні виклики, що вимагає впровадження ефективних методів контролю. Моніторинг якості води є критично важливим для збереження екологічної рівноваги, забезпечення безпечного водопостачання та запобігання поширенню шкідливих забруднень. Традиційні підходи, які базуються на відборі проб і лабораторних аналізах, є трудомісткими, ресурсозатратними та не забезпечують моніторинг у реальному часі, що обмежує можливості оперативного реагування на забруднення [1].

**Проблеми традиційних методів контролю якості води.** Сучасні системи контролю якості води здебільшого базуються на хімічному аналізі, який, хоча й забезпечує високу точність, має низку суттєвих недоліків:

## *Розроблення інтелектуальної системи моніторингу водних ресурсів*

- висока вартість обладнання та реагентів, що обмежує можливість широкомасштабного застосування;
- трудомісткість процесу відбору проб, їхнього транспортування та лабораторного аналізу;
- низька оперативність, оскільки результати аналізу потребують значного часу для отримання;
- обмежений доступ до моніторингу у віддалених та важкодоступних регіонах, що ускладнює контроль за якістю водних ресурсів у реальному часі.

З метою подолання цих проблем сучасні технології спектроскопічного аналізу дають змогу розробляти автоматизовані системи моніторингу якості води, що працюють у режимі реального часу. Такі системи, використовуючи компактні та економічно доступні пристрої, забезпечують швидкий і надійний аналіз без необхідності застосування хімічних реагентів.

**Спектроскопія як інноваційний метод моніторингу.** Спектроскопічний аналіз є перспективною технологією для моніторингу водних ресурсів, оскільки він дозволяє визначати фізико-хімічні характеристики води на основі її оптичних властивостей. Цей метод дає змогу ідентифікувати забруднюючі речовини, аналізуючи їх спектральні характеристики у видимому та інфрачервоному діапазонах. Інтеграція спектроскопічних сенсорів із мікроконтролерними системами відкриває можливості для створення автономних, мобільних і високоточних рішень для контролю якості води.

Його застосування у моніторингу водних ресурсів має низку значних переваг:

- безреагентний аналіз,
- швидкість та оперативність,
- виявлення широкого спектра забруднень,
- можливість дистанційного моніторингу.

Сучасні спектроскопічні сенсори, такі як AS7265x, працюють у видимому (VIS) та ближньому інфрачервоному (NIR) діапазонах, що робить їх ефективним інструментом для ідентифікації забруднень у воді. Поєднання цих сенсорів із мікроконтролерними платформами, такими як ESP32, дозволяє створювати енергоефективні та портативні системи для автономного моніторингу водних ресурсів [3].

**Використання мікроконтролерів для автоматизації.** Інтеграція спектроскопічного аналізу з мікроконтролерами (Arduino, ESP32) дозволяє створювати портативні пристрої, які можуть:

- збирати дані про якість води в реальному часі,
- передавати результати аналізу через бездротові технології (Wi-Fi, LoRa),
- використовувати машинне навчання для класифікації забруднень та прогнозування ризиків.

Такі системи є перспективними для екологічного моніторингу, оскільки поєднують високу точність спектроскопічного аналізу з гнучкістю та автономністю мікроконтролерів [4].

**Екологічний та соціальний вплив.** Впровадження автоматизованих спектроскопічних систем для контролю якості води сприятиме:

- оперативному виявленню екологічних катастроф,
- поліпшенню санітарних умов у містах і сільській місцевості,
- оптимізації водоочисних процесів,
- запобіганню поширенню інфекцій, пов'язаних із забрудненою водою.

Таким чином, розробка інтелектуальної спектроскопічної системи аналізу водних ресурсів є надзвичайно актуальною задачею з точки зору екологічної безпеки, громадського здоров'я та розвитку технологій Інтернету речей (IoT) для моніторингу навколишнього середовища.

**Теоретичні засади застосування спектроскопії для моніторингу води.** Спектроскопічні методи аналізу води ґрунтуються на фізичних явищах поглинання, розсіювання та флуоресценції електромагнітного випромінювання при його взаємодії з молекулами, розчиненими у водному середовищі. Основою спектроскопії є залежність поглинання світла від молекулярного складу розчину, що дозволяє оцінити наявність і концентрацію органічних та неорганічних забруднень.

Органічні забруднення, такі як нафтопродукти, пестициди, феноли та хлорорганічні сполуки, мають характерні спектральні смуги поглинання у видимому (VIS) та ближньому інфрачервоному (NIR) діапазонах. Наприклад, ультрафіолетова (UV) спектроскопія дозволяє виявляти сполуки, що містять ароматичні кільця та ненасичені хімічні зв'язки, які поглинають світло в діапазоні 200 – 400 нм [2].

Ближній інфрачервоний (NIR) діапазон (700–2500 нм) широко використовується для визначення концентрації розчинених органічних речовин та біологічної активності у воді. Методика ґрунтується на поглинанні гармонік і комбінаційних коливань молекулярних зв'язків C-H, N-H та O-H, характерних для органічних сполук [3].

Флуоресцентна спектроскопія дозволяє ідентифікувати органічні забрудники за їх здатністю випромінювати світло при поглинанні УФ-випромінювання. Наприклад, поліциклічні ароматичні вуглеводні (ПАВ), що є токсичними компонентами нафтопродуктів, мають виражені флуоресцентні спектри, які використовуються для їх кількісного аналізу у воді [1].

Таким чином, спектроскопічні методи є ефективним інструментом для ідентифікації та кількісного визначення забруднень, що дозволяє проводити моніторинг водних ресурсів у реальному часі без застосування хімічних реагентів.

**Особливості роботи сенсора AS7265x у видимому та ближньому інфрачервоному діапазонах.** Сенсор AS7265x є триканальним спектрометром, що охоплює діапазон довжин хвиль 410–940 нм, що дозволяє проводити спектроскопічний аналіз води у видимому (VIS) та ближньому інфрачервоному (NIR) діапазонах (табл. 1.). Даний сенсор складається з трьох інтегрованих чипів (AS72651, AS72652, AS72653), які разом забезпечують 18 спектральних каналів для аналізу хімічного складу розчину.

Таблиця 1

**Основні характеристики сенсора AS7265x**

| Діапазон вимірювань | Кількість спектральних каналів           | Тип спектральних фільтрів                         | Вбудовані світлодіоди (LED) для збудження флуоресценції | Інтерфейс зв'язку      | Живлення | Роздільна здатність вимірювань |
|---------------------|------------------------------------------|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|------------------------|----------|--------------------------------|
| 410-940 нм          | 18 (6 каналів для кожного з трьох чипів) | Інтегровані вузькосмугові інтерференційні фільтри | Білі, 405 нм, 475 нм"                                   | I <sup>2</sup> C, UART | 3,3 В    | До 16 біт                      |

Принцип роботи сенсора базується на використанні фільтрованих фотодетекторів, які реєструють спектральні сигнали у визначених діапазонах. Отримані спектральні дані можуть бути використані для аналізу органічних та неорганічних забруднень шляхом порівняння їх з еталонними спектрами чистої води [4].

У контексті моніторингу води, сенсор AS7265x може використовуватися для виявлення спектральних змін, спричинених наявністю органічних забруднень, оцінки рівня кольоровості та визначення показників мутності. Наприклад, вимірювання в діапазоні 600–800 нм дозволяють ідентифікувати наявність гумінових кислот, які є біомаркерами природного органічного забруднення [3].

Даний сенсор у поєднанні з мікроконтролерами дозволяє створити автономну спектроскопічну систему для аналізу якості води, що може працювати у складі IoT-платформи для віддаленого моніторингу.

**Розроблення прототипу інтелектуальної системи аналізу якості водних ресурсів.** Ефективний моніторинг якості водних ресурсів вимагає застосування сучасних методів аналізу, здатних забезпечувати точність, швидкість та автономність роботи. Запропонована система

## *Розроблення інтелектуальної системи моніторингу водних ресурсів*

складається з кількох ключових модулів: стаціонарної, переносної та автоматизованої систем для аналізу водних ресурсів. Кожна з них оптимізована під відповідні умови експлуатації та передбачає використання спектроскопічного аналізу для виявлення забруднень у реальному часі.

Стаціонарна система моніторингу якості води складається із сенсорної платформи, яка включає спектральний сенсор AS7265x, захищений герметичним корпусом для мінімізації впливу зовнішніх факторів, таких як волога, пил та механічні пошкодження. Для освітлення проби води використовуються LED-елементи з діапазоном 400–900 нм, що забезпечують рівномірне та ефективне збудження флуоресценції. Світло спрямовується через фокусуючу лінзу, яка концентрує його на сенсор, підвищуючи точність вимірювань.

Відстань між сенсором та досліджуваним зразком регулюється у межах 4–10 см, що дозволяє адаптувати систему до різного рівня прозорості води та концентрації забруднень. Для запобігання потраплянню сторонніх частинок у вимірювальну камеру використовується груба фільтрація, яка усуває великі механічні домішки. Перед початком роботи проводиться калібрування системи на чистій воді, що забезпечує встановлення базових параметрів вимірювань та усуває можливі похибки.

Переносна система моніторингу якості води призначена для мобільного аналізу в польових умовах. Вона містить компактний портативний модуль на базі ESP32, що працює від вбудованого акумулятора з можливістю заряджання від сонячних панелей. Сенсорний блок та джерело світла розміщені у герметичному корпусі, що дозволяє використовувати пристрій у складних природних умовах. Для проведення аналізу проба води набирається у спеціальний прозорий контейнер, який забезпечує стабільну товщину шару рідини під час вимірювань, мінімізуючи похибки через зміну оптичної довжини проходження світла.

Отримані дані обробляються вбудованим мікроконтролером та автоматично передаються на мобільний пристрій через Wi-Fi або Bluetooth, що забезпечує швидкий доступ до результатів вимірювань у режимі реального часу. Це дозволяє оперативно оцінювати стан води без необхідності транспортування зразків у лабораторію.

Автоматизована система аналізу водних ресурсів розроблена для безперервного контролю якості води у природних водоймах. Вона використовує постійний потік води, який пропускається через прозорий вимірювальний резервуар товщиною 4–5 см, що створює стабільні умови для аналізу. Вбудований спектральний сенсор здійснює вимірювання концентрації забруднень у реальному часі, а результати автоматично передаються на віддалений сервер для подальшого збереження, аналізу та візуалізації даних.

Система оснащена автоматичним механізмом оповіщення, який генерує аварійні сигнали у разі перевищення допустимих концентрацій забруднень та отримуємо миттєві сповіщення, що дозволяє оперативно вживати заходів щодо усунення джерела забруднення.

Поєднання стаціонарної, переносної та автоматизованої систем дозволяє створити комплексний моніторинг якості води в різних умовах, забезпечуючи високу точність, оперативність аналізу та гнучкість використання в екологічних та наукових дослідженнях.

Для підвищення ефективності та довговічності системи рекомендовано використовувати корозійностійкі матеріали, такі як нержавіюча сталь або ABS-пластик. Живлення системи може забезпечуватися акумуляторними батареями або сонячними панелями, що підвищує її автономність. Сенсори та оптичні компоненти потребують регулярного очищення для запобігання накопиченню нальоту та органічних відкладень.

Організація процесу в природних умовах передбачає адаптацію системи до реальних умов експлуатації. Для цього вхідний потік води проходить через сітчастий фільтр із розміром комірок 300 мкм, що дозволяє затримувати великі частинки. Регульований насос підтримує стабільну швидкість потоку води, а датчі витрати (YF-S201) та тиску забезпечують контроль гідродинамічних параметрів.

Для запобігання накопиченню забруднень у вимірювальному резервуарі застосовується

система самоочищення з використанням ультразвукового очищення на частоті 40 кГц (давач NU40C10T-1), дозволяючи ефективно видаляти наліт та осади, а також використання механічних щіток для додаткового очищення (на перспективу) внутрішніх поверхонь камери.

Запропонована система (рис. 1) уможливить поєднання стаціонарних та переносних рішень для аналізу води, що дозволить здійснювати комплексний моніторинг у різних умовах. Це забезпечить високу точність вимірювань, оперативність отримання даних та можливість інтеграції в екологічних програмах контролю якості водних ресурсів.

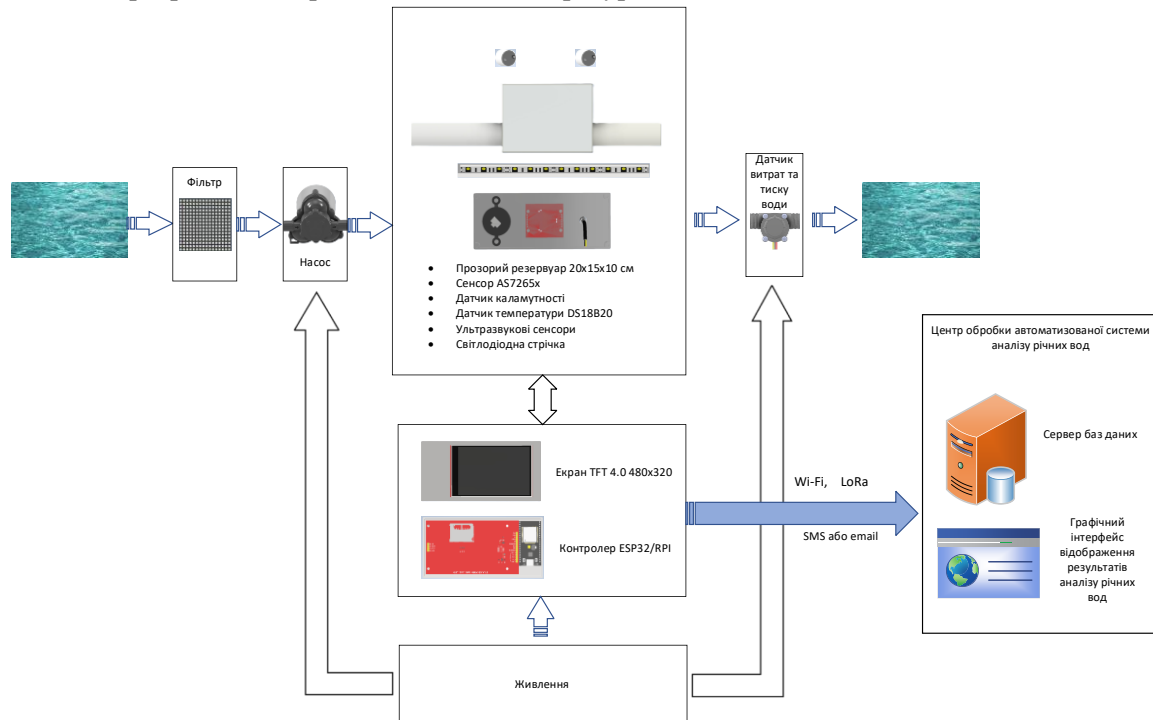


Рис. 1. Структурна схема інтелектуальної системи моніторингу водних ресурсів

**Гідродинамічна система аналізу води.** Гідродинамічна система аналізу води забезпечує оптимальні умови для спектроскопічного аналізу та точного вимірювання параметрів води в режимі реального часу. Конструкція системи дозволяє підтримувати стабільний потік, захищати вимірювальну камеру від забруднень та автоматично очищувати оптичні компоненти для збереження точності вимірювань.

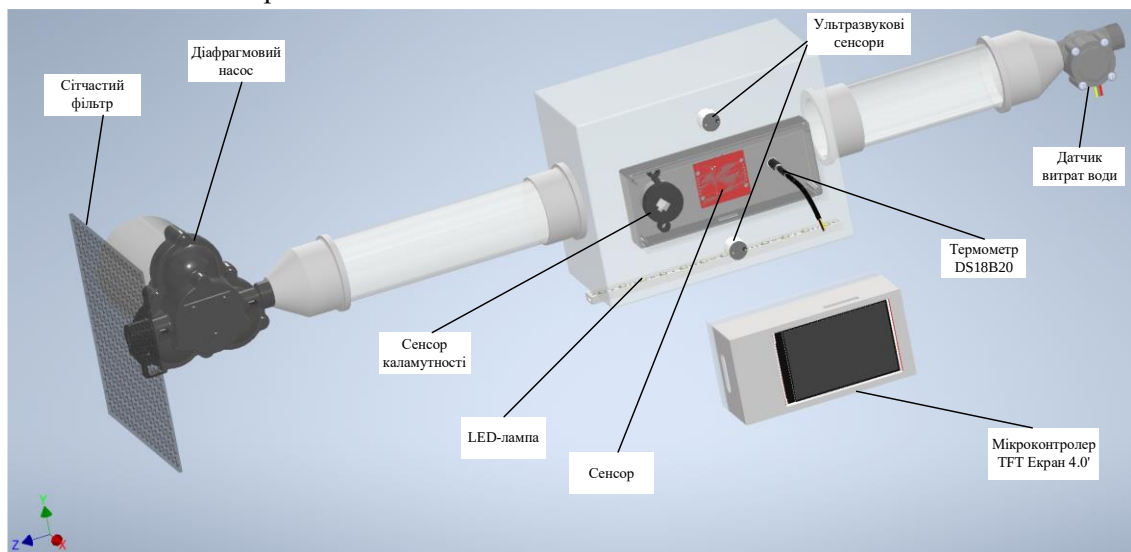


Рис. 2. Прототип автоматизованої системи аналізу водних ресурсів

**Структура аналізатора.** Вода з водойми подається через насос із контрольованою швидкістю потоку в діапазоні 1–2 літри за хвилину, що забезпечує рівномірне надходження зразків для аналізу. Далі вона проходить у прозорий вимірювальний резервуар, товщина шару води в якому становить 5–10 см. Така конфігурація створює оптимальні умови для спектроскопічного аналізу, оскільки достатня товщина шару води дозволяє отримати чіткий спектр без значних оптичних втрат.

Прозорі стінки резервуара виготовлені з матеріалів, стійких до механічних пошкоджень і хімічного впливу, таких як боросилікатне скло або акрил, що забезпечує довговічність конструкції.

Для точного аналізу на внутрішніх стінках резервуара розміщені джерело світла та сенсор AS7265x. Джерело світла – багатоканальні LED-лампи, що працюють у спектральному діапазоні 400–900 нм, забезпечуючи рівномірне освітлення проби. Сенсор AS7265x встановлений під кутом 90° до світлового потоку, що дозволяє мінімізувати вплив прямого відбиття та покращує якість зчитування спектральних даних.

**Захист від сторонніх часток.** Перед резервуаром встановлена система фільтрації, що запобігає потраплянню сторонніх об'єктів у камеру аналізу. Грубий фільтр якої ефективно видаляє великі частки, такі як галька, листя, мул, забезпечуючи стабільний потік чистої води, а для усунення дрібних зважених часток може бути встановлений додатковий механічний або мембранний фільтр, який покращує якість аналізу, запобігаючи розсіюванню світла від суспензій.

**Контроль температури.** Оскільки оптичні характеристики води змінюються залежно від температури, система оснащена термодатчиком, що забезпечує постійний моніторинг температури води в реальному часі. Для мінімізації впливу зовнішніх температурних коливань резервуар ізольований, що дозволяє зберігати стабільні умови аналізу незалежно від погодних умов.

**Автоматична очистка.** З метою підтримання чистоти вимірювальної камери та запобігання накопиченню нальоту, водоростей чи органічних відкладень система оснащена автоматичним механізмом очищення:

Механічні щітки можуть періодично очищати внутрішні стінки резервуара, усуваючи осади.

Ультразвукове очищення (наприклад, на частоті 40 кГц) дозволяє видаляти дрібні відкладення та запобігає зростанню мікроорганізмів.

#### **Моніторинг водних ресурсів у реальному часі:**

- Обробка даних здійснюється сенсором AS7265x, який зчитує спектральну інформацію про воду, виявляючи аномалії в розсіяному світлі та рівнях поглинання і як наслідок це дозволяє ідентифікувати концентрацію фекальних та інших забруднень. Дані передаються на контролер (ESP32), де відбувається первинна обробка.

- Передача даних відбувається через Wi-Fi або мобільний зв'язок (за допомогою модема 4G) надсилаються на сервер у реальному часі. Формат даних: JSON із вказаними параметрами (дата, час, координати, спектральні характеристики).

- Збереження та аналіз даних здійснюється на сервері в базі даних. При цьому використовуються аналітичні програмні засоби та методи машинного навчання для виявлення тенденцій забруднення та прогнозування його подальшого розвитку

- Графічний інтерфейс відображає параметри води у зручному вигляді: графіки концентрацій забруднень, температури та спектрального аналізу в динаміці.

#### **Аварійні сигнали:**

- Виявлення критичних рівнів забруднень відбувається за перевищення встановлених порогових значень причому система фіксує подію як аварійну.

- Система сповіщення працює через кілька каналів: SMS або e-mail, push-сповіщення у мобільному додатку, сигнал до централізованої диспетчерської.

У разі аварії активується звуковий сигнал або миготіння LED-індикаторів на пристрої для візуального попередження. Також передбачено інтеграцію з іншими системами, наприклад, автоматичне закриття шлюзів або повідомлення про необхідність очищення річкової зони.

Перевагами автоматизованої системи є постійний моніторинг, що забезпечує безперервний збір даних навіть у важкодоступних місцях; оперативність забезпечується миттєвими сповіщеннями, що дозволяють швидко реагувати на забруднення; масштабованість системи може бути розгорнута на кількох точках водойми для створення мережі моніторингу; точність спектрального аналізу досягається ідентифікацією навіть мінімальних концентрацій забруднень.

Ця система підходить для екологічного моніторингу водних ресурсів, забезпечуючи високу ефективність та надійність.

### Результати та обговорення

Для розрахунку оптимальної відстані сенсора AS7265x від зразків води слід врахувати основні фактори, а саме:

- оптичні властивості води (чиста вода поглинає світло сильніше в УФ та видимому спектрах, забруднення змінюють коефіцієнт відбиття та поглинання);
- чутливість сенсора AS7265x (діапазон сенсора (410–940 нм) потребує врахування інтенсивності світла, максимальна чутливість сенсора при певному рівні освітлення);
- джерело світла (інтенсивність джерела світла повинна бути достатньою для проникнення через воду та відображення від забруднень).

Для оцінки оптимальної відстані між сенсором і зразком скористаємось законом Бугера–Ламберта–Бера [6,7]:

$$I = I_0 \times e^{-kd}, \quad (1)$$

де:  $I$  - інтенсивність світла, що досягла сенсора,  $I_0$  — початкова інтенсивність світла,  $k$  - коефіцієнт поглинання (залежить від довжини хвилі, концентрації забруднень і оптичних властивостей води),  $d$  - відстань від джерела світла до сенсора через середовище.

Коефіцієнт поглинання для чистої води та забруднень має наступні параметри: для води ( $k_w$ ):  $0.05\text{--}0.2\text{ см}^{-1}$ , а для фекальних забруднень ( $k_f$ ):  $0.2\text{--}1.5\text{ см}^{-1}$ .

Визначимо допустиму втрату інтенсивності, для якої  $I/I_0 = 0.1$  (10% інтенсивності має досягати сенсора):

$$0.1 = e^{-kd}. \quad (2)$$

Входячи з формули (2), отримаємо:

$$d = \frac{-\ln(0.1)}{k}. \quad (3)$$

Для чистої води при  $k_w=0.1\text{ см}^{-1}$ ,  $d \approx 23\text{ см}$ ,

Для фекальних забруднень при  $k_f=0.5\text{ см}^{-1}$ ,  $d \approx 4.6\text{ см}$ .

Оптимальна відстань для комбінованих умов повинна бути: 4–5 см для забруднених зразків, 10–20 см для води з мінімальним рівнем забруднення.

Розрахуємо об'єм потоку води через трубу:

$$Q = A_{\text{труби}} \times v, \quad (4)$$

де:  $Q$  – витрата рідини через трубу ( $\text{м}^3/\text{с}$ ),  $A$  — площа перерізу труби ( $\text{м}^2$ ),  $v$  — швидкість потоку води ( $\text{м}/\text{с}$ ).

Площа перерізу труби:

$$A = \pi \times \left(\frac{d}{2}\right)^2, \quad (5)$$

де  $d = 0.05\text{ м}$  — діаметр труби.

Для якісного спектрального аналізу води, оптимальна швидкість потоку повинна становити  $v = 0.1\text{ м}/\text{с}$ .

На основі проведених розрахунків за діаметра труби 5 см витрата становить 0,196 л/с, що є достатнім для безперервного моніторингу

Параметри резервуара для проведення аналізу становлять: 0,02 м - довжина, 0,01 м - ширина і 0,015 м - висота.



Для гідродинамічних розрахунків припустимо, що потік води стабільний і система працює у стаціонарному режимі та визначимо наступне:

Час перебування води в резервуарі:

$$t_{\text{рез}} = \frac{V_{\text{рез}}}{Q}, \quad (6)$$

де  $V_{\text{рез}}$  – об'єм резервуара (Зл),  $Q$  – витрата води через резервуар (0.12–0.3 л/с)

Виходячи з формули (6), час перебування зразка у резервуарі складає 10–25 с.

Відповідно до закону збереження маси, швидкість потоку (рис. 3) визначимо як:

$$Q = v \cdot A_{\text{труби}}, \quad (7)$$

де  $v$  – швидкість води в трубі (см/с),  $A_{\text{труби}} = 19.63 \text{ см}^2$  – площа поперечного перерізу труби.

Отже швидкість потоку води в трубі варіюється 6.11–15.28 см/с.

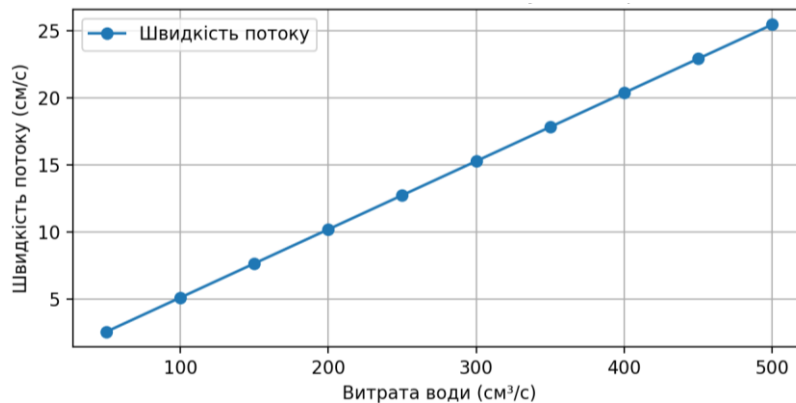


Рис. 3. Залежність швидкості потоку від витрати води

На основі отриманого графіка встановлено, що зі збільшенням витрати води швидкість потоку також зростає лінійно. Також це свідчить про пропорційну залежність між витратою води та швидкістю потоку у даній системі.

Для оцінки режиму потоку визначимо число Рейнольдса за формулою [8,9,10] (рис.4):

$$Re = \frac{vd}{\nu}, \quad (8)$$

де  $\nu$  – кінематична в'язкість води (0.01 см²/с).

Підставивши значення у (8), отримаємо:

$Re_{\text{мін}} \approx 3055 \rightarrow$  перехідний режим (ламінальний-турбулентний),

$Re_{\text{макс}} \approx 7640 \rightarrow$  турбулентний режим (для швидких потоків).

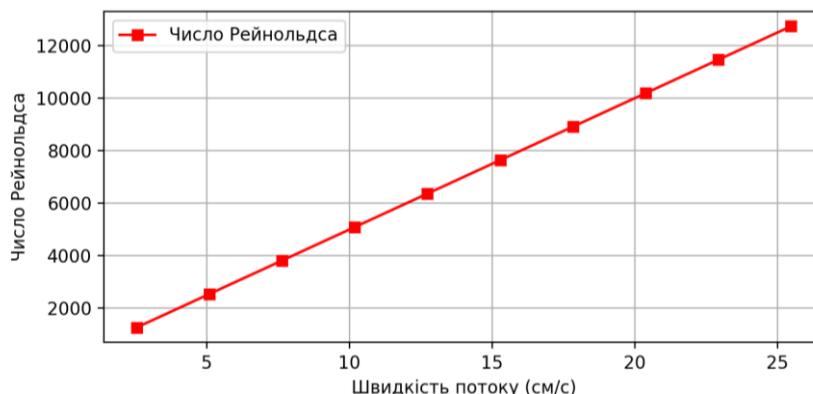


Рис. 4. Число Рейнольдса у залежності від швидкості потоку

Даний графік демонструє зростання числа Рейнольдса за збільшенні швидкості потоку. Також це вказує на зміну режиму течії: при низьких значеннях швидкості потоку рідина може перебувати у ламинарному режимі, а при високих – наближатися до турбулентного режиму.

За рівнянням неперервності потоку здійснимо математичне моделювання потоку води із

фекальними домішками, що визначає об'єм потоку води, який входить у резервуар, рівний об'єму, який виходить з нього (4):

$$Q = A \times v = \text{const},$$

де  $Q$  — витрата потоку ( $\text{м}^3/\text{с}$ ),  $A$  — площа поперечного перерізу шару води ( $\text{м}^2$ ),  $v$  — швидкість потоку води ( $\text{м}/\text{с}$ ).

Для опису потоку з домішками слід враховувати динаміку рідини та частинок забруднень скориставшись гідродинамічним рівнянням Нав'є-Стокса [11,12,13,14,15]:

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + (v \cdot \nabla) v \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 v + F, \quad (9)$$

де:  $\rho$  — густина рідини ( $\text{кг}/\text{м}^3$ ),  $v$  — швидкість потоку (вектор,  $\text{м}/\text{с}$ ),  $p$  — тиск (Па),  $\mu$  — в'язкість рідини (Па·с),  $F$  — сила, що діє на домішки (Н).

Моделювання концентрації домішок (фекалій) у потоці води описує рівняння переносу:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + v \nabla C = D \nabla^2 C, \quad (10)$$

де  $C$  — концентрація домішок ( $\text{кг}/\text{м}^3$ ),  $D$  — коефіцієнт дифузії ( $\text{м}^2/\text{с}$ ),  $v$  — швидкість потоку ( $\text{м}/\text{с}$ ).

Рівняння (10) показує, яким чином домішки розподіляються в потоці води, враховуючи їх перенос і дифузію (рис. 5).

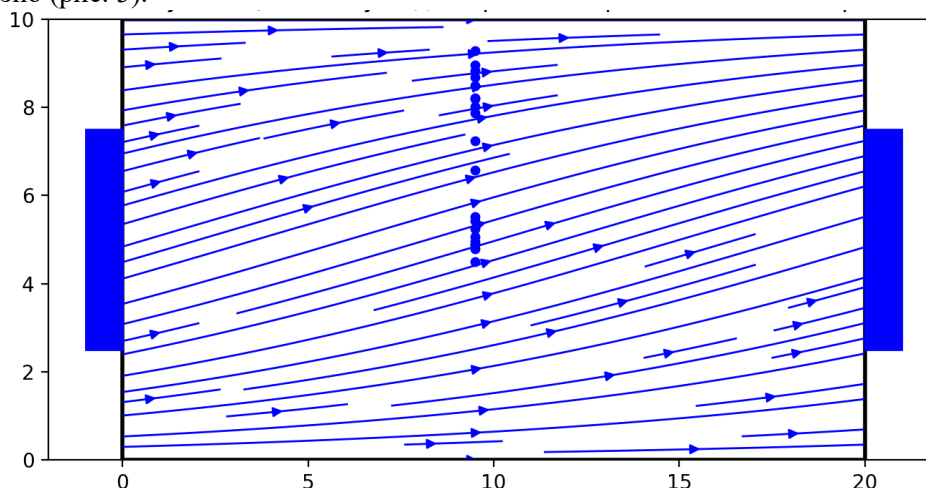


Рис. 5. Візуалізація потоку води через спектральний аналізатор

Для аналізу взаємодії світла із зразком води (спектроскопія) скористаємося законом Бугера-Ламберта-Бера рівнянням (1), згідно якого спектральний аналіз забезпечує визначення концентрації домішок за залежністю  $\alpha = \epsilon C$ , де  $\epsilon$  — молярний коефіцієнт поглинання, що залежить від речовини і довжини хвилі світла.

Відповідно до чого встановлено, що зі збільшенням концентрації забруднень зростає і поглинання світла, тобто зразок виглядає темнішим у певних діапазонах спектру. Спектральний аналіз використовує цей ефект для визначення складу та концентрації домішок у воді.

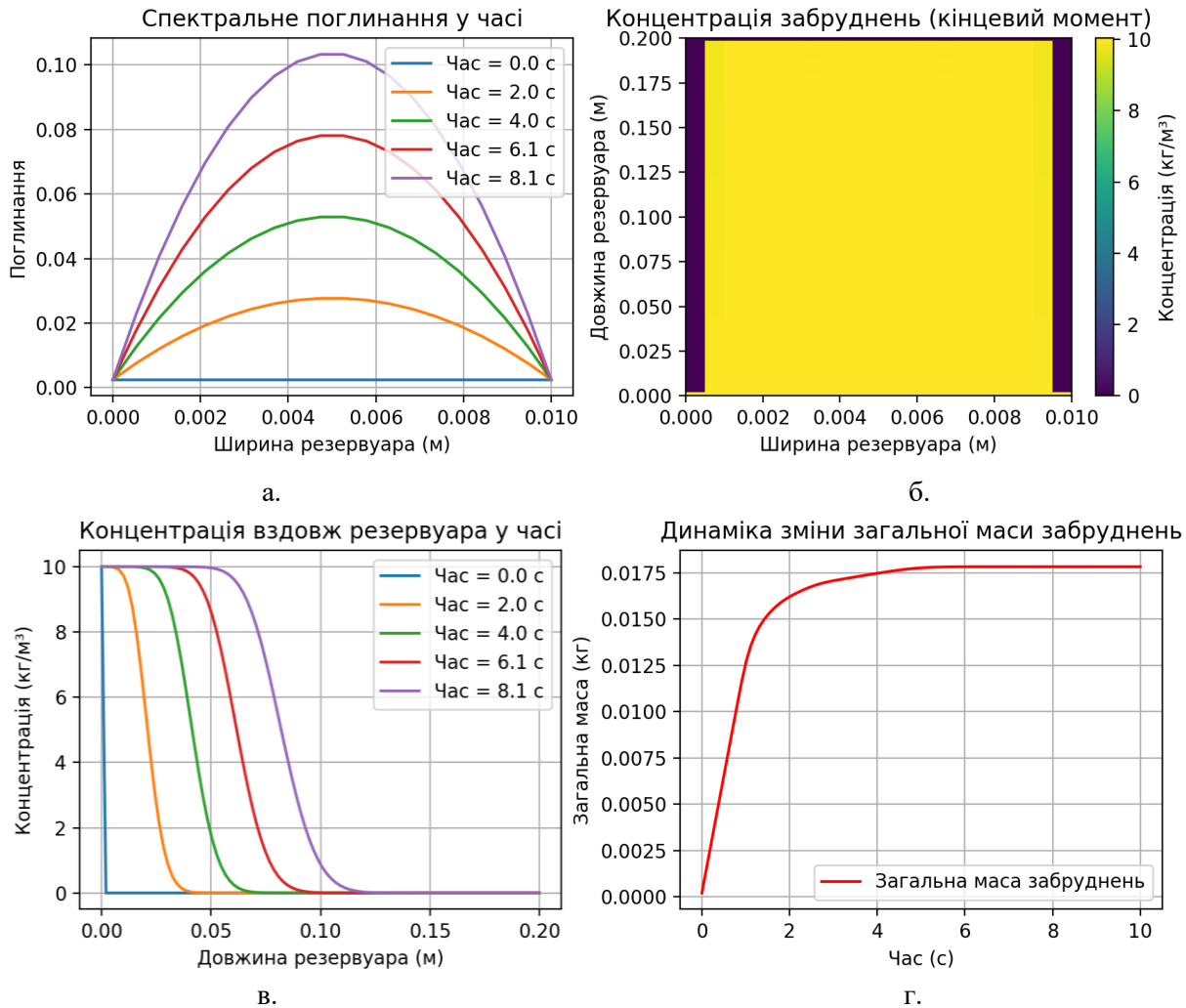


Рис. 6. Моделювання концентрації домішок:

а. спектральне поглинання у часі, б. концентрація забруднень в. графік процесу дифузії або перемішування забруднень у воді, г. динаміка зміни загальної маси забруднень

Графічні залежності (рис. 6а) відображають зміну поглинання світла у резервуарі в різні моменти часу (0.0 с, 2.0 с, 4.0 с, 6.1 с та 8.1 с). Збільшення часу призводить до зростання поглинання, яке досягає максимуму, а потім зменшується. Основна частина резервуара (рис. 6б) забруднена рівномірно (жовтий колір), а на краях видно зони меншої концентрації (темніші ділянки). Це вказує на локалізоване поширення забруднень із поступовим їх накопиченням. Криві (рис. 6в) відображають зміну концентрації забруднень уздовж резервуара в різні моменти часу. В початковий момент часу концентрація є низькою, але з часом вона зростає та поширюється уздовж резервуара. Крива (рис. 6г) демонструє швидке накопичення забруднень на початку, яке поступово стабілізується. Це свідчить про те що система досягає динамічної рівноваги, коли забруднення вже не збільшується в об'ємі води.

### Висновки

Розроблено інтелектуальну систему моніторингу якості водних ресурсів, що базується на спектральному аналізі, оптичних сенсорах і мікроконтролерних платформах. Дана система дозволяє проводити автоматизований аналіз фізико-хімічних параметрів води, що значно підвищує ефективність контролю за станом водних ресурсів.

Запропонована система забезпечує безперервний аналіз та раннє виявлення забруднень у воді в режимі реального часу, що дозволяє оперативно реагувати на зміни та виявляти джерела

антропогенного впливу. Відмінністю від традиційних методів є можливість отримання спектральних характеристик води без застосування хімічних реагентів.

Проведено математичне моделювання гідродинамічних параметрів потоку води через вимірювальний резервуар, що дозволило оптимізувати умови аналізу. Встановлено, що для забезпечення точності вимірювань необхідно підтримувати стабільну товщину шару води та контрольовану швидкість потоку, що зменшує вплив оптичних спотворень на спектральні показники.

Досліджено вплив температурного фактора на спектральні характеристики води, що дозволило врахувати необхідність корекції вимірювань. Вбудований термометр DS18B20 забезпечує автоматичну компенсацію температурних змін, підвищуючи достовірність отриманих результатів.

Система підтримує кілька режимів роботи, включаючи стаціонарний, переносний та автоматизований моніторинг, що дозволяє адаптувати її до різних умов експлуатації. Це дає змогу використовувати її для екологічного контролю природних водойм, моніторингу стану водоочисних споруд та проведення наукових досліджень з вивчення процесів забруднення водних ресурсів.

Запроектовано систему аварійного сповіщення щодо виявлення перевищення допустимих рівнів забруднень. Сповіщення надсилаються через Wi-Fi, мобільний зв'язок або IoT-платформи, що забезпечує високу швидкість передачі даних та можливість інтеграції із зовнішніми інформаційними системами екологічного моніторингу.

Запропонована система значно перевершує традиційні методи аналізу якості води за рахунок безреагентного підходу, мобільності, можливості дистанційного контролю та автоматизованого збору й обробки даних. Зменшення витрат на витратні матеріали та оперативність аналізу роблять цю технологію перспективною для широкого впровадження у практику моніторингу водних ресурсів.

#### Перелік використаних джерел

- [1] WHO "Water Quality and Health," World Health Organization, 2021
- [2] Smith, J., & Brown, P. "Advances in Spectroscopic Water Analysis," Journal of Environmental Science, vol. 45, no. 3, 2022. [https://doi.org/10.1016/0309-1708\(80\)90018-4](https://doi.org/10.1016/0309-1708(80)90018-4)
- [3] Ren, L., & Zhang, Y. "Near-infrared Spectroscopy for Water Quality Assessment," Sensors, vol. 21, no. 8, 2023.
- [4] "Spectral Triad (AS7265x) Hookup Guide", <https://learn.sparkfun.com/tutorials/spectral-triad-as7265x-hookup-guide/all>, AS7265x\_Datasheet.pdf
- [5] Gupta, S., & Kumar, A. "IoT-based Water Quality Monitoring System," IEEE Transactions on Environmental Monitoring, vol. 12, no. 2, 2022.
- [6] D. A. Skoog, F. J. Holler, and S. R. Crouch, *Principles of Instrumental Analysis*, 7th ed. Cengage Learning, 2017.
- [7] D. C. Harris, *Quantitative Chemical Analysis*, 10th ed. W. H. Freeman, 2020.
- [8] H. Schlichting and K. Gersten, "Boundary-Layer Theory," 9th ed. Springer, 2016. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-52919-5>
- [9] F. M. White, "Fluid Mechanics," 8th ed., McGraw-Hill, 2015.
- [10] C. T. Crowe, J. A. Roberson, and D. F. Elger, "Engineering Fluid Mechanics," 10th ed., Wiley, 2016.
- [11] H. Schlichting and K. Gersten, "Boundary-Layer Theory," 9th ed., Springer, 2016. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-52919-5>
- [12] L. D. Landau and E. M. Lifshitz, "Fluid Mechanics," 2nd ed., Pergamon Press, 1987.
- [13] G. K. Batchelor, "An Introduction to Fluid Dynamics," Cambridge University Press, 2000. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511800955>
- [14] C. Pozrikidis, "Introduction to Theoretical and Computational Fluid Dynamics," Oxford University Press, 2011.
- [15] P. A. Davidson, "Turbulence: An Introduction for Scientists and Engineers," Oxford University Press, 2015. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780198722588.001.0001>
- [16] Батанов С.Ю. Гідравліка та гідравлічні машини. – К.: Либідь, 2010.

- [17] White, F. M. Fluid Mechanics. – 9th Edition. McGraw-Hill, 2021.
- [18] Munson, B. R., Young, D. F., Okiishi, T. H. Fundamentals of Fluid Mechanics. – 8th Edition. Wiley, 2018.
- [19] Лісовий В. М. Гідравліка та гідропневмопривід. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2011.
- [20] Fox, R. W., McDonald, A. T., Pritchard, P. J. Introduction to Fluid Mechanics. – 8th Edition. Wiley, 2016.
- [21] Гусаков В. П. Гідродинаміка в інженерних розрахунках. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2019.
- [22] Kundu, P. K., Cohen, I. M., Dowling, D. R. Fluid Mechanics. – 6th Edition. Academic Press, 2015.
- [23] Korpyljov D., Zdobytskyi A., Marikutsa U., Tomyuk V., Panchak R. Interactive system of surface water monitoring using IoT technologies. Computer Design Systems. Theory and Practice. Vol. 4. Number 1. ISSN 2707-6784, 2022, pp. 1-8. <https://doi.org/10.23939/cds2022.01.001>
- [24] Arduino Based Ambient Air Pollution Sensing System Lobur, M., Korpyljov, D., Jaworski, N., Iwaniec, M., Marikutsa, U. *International Conference on Perspective Technologies and Methods in MEMS Design*, 2020, pp. 32–35, 9109460 <https://doi.org/10.1109/MEMSTECH49584.2020.9109460>

**Dmytro Korpyljov<sup>1</sup>, Andriy Zdobytskyi<sup>2</sup>, Olha Mokrytska<sup>3</sup>, Volodymyr Chernyukh<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>Computer Aided Design Department, Lviv Polytechnic National University, 12, S. Bandery str. Ukraine, Lviv, E-mail: [olha.v.mokrytska@lpnu.ua](mailto:olha.v.mokrytska@lpnu.ua), ORCID 0009-0009-1300-3335

<sup>2</sup>Computer Aided Design Department, Lviv Polytechnic National University, 12, S. Bandery str. Ukraine, Lviv, E-mail: [olha.v.mokrytska@lpnu.ua](mailto:olha.v.mokrytska@lpnu.ua), ORCID 0000-0001-8044-9593

<sup>3</sup>Computer Aided Design Department, Lviv Polytechnic National University, 12, S. Bandery str. Ukraine, Lviv, E-mail: [olha.v.mokrytska@lpnu.ua](mailto:olha.v.mokrytska@lpnu.ua), ORCID 0000-0002-2887-9585

<sup>4</sup>LCME Lvivvodokanal, Head of Environmental Control Department Zelena str., Ukraine, Lviv, E-mail: [chernyukh.volodymyr@gmail.com](mailto:chernyukh.volodymyr@gmail.com)

## **DEVELOPMENT OF AN INTELLIGENT MONITORING SYSTEM FOR WATER RESOURCES**

Received: February 12, 2025 / Revised: February 26, 2025 / Accepted: March 12, 2025

© Korpyljov D., Zdobytskyi A., Mokrytska O., Chernyukh V., 2025

**Abstract.** The article presents the development of a spectroscopic water resource monitoring system utilizing modern optical sensors and microcontrollers for real-time automated water quality assessment. The primary objective is to create an intelligent system for water condition evaluation, enabling the detection of organic and inorganic contaminants through spectral analysis.

The system is equipped with the AS7265x spectroscopic sensor, operating in the visible and near-infrared ranges, allowing for high-precision spectral analysis. Additionally, a DFRobot turbidity sensor and a waterproof DS18B20 temperature sensor are integrated to enhance measurement accuracy. Data management and processing are carried out using an ESP32 microcontroller, which ensures data collection, analysis, and transmission via Wi-Fi, as well as data storage on an SD card for further processing.

The practical application of the developed system includes ecological monitoring of natural and anthropogenic water bodies, evaluating the efficiency of filtration systems, and promptly detecting changes in water composition. The integration of spectroscopy, sensor analysis, and artificial intelligence creates a powerful tool to enhance the efficiency and accessibility of water resource monitoring.

**Keywords:** spectroscopy, optical sensor, microcontroller, spectral analysis, environmental monitoring, water pollution, ultrasonic purification, intelligent system, water quality, water resources.