

## СТАНДАРТИЗАЦІЯ, МЕТРОЛОГІЯ І СЕРТИФІКАЦІЯ

УДК 681.7.014.3

<sup>1</sup>В.Г. Губар [0000-0001-9440-0109]<sup>2</sup>І.О. Адаменко [0000-0002-9053-7551]

## МОДЕЛЬ ПРИСТРОЮ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ РОЗМІРУ ТА КОНЦЕНТРАЦІЇ ДОМІШОК

<sup>1</sup>Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», sl.gubar@ukr.net<sup>2</sup>Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», ira\_adamenko@ukr.net

**Анотація.** Розглянуто існуючі рішення та їх недоліки, які у роботі вирішуються завдяки використанню модуляції світлового потоку, розширенню кількості каналів вимірювань, вибору лазерних матриць для джерела світла. Запропонована модель пристрою для вимірювання розміру та кількості домішок має збільшену чутливість приладу, яка обумовлена використанням матриці сучасних лазерів з різною довжиною хвилі. Джерело світла та фотоприймальний пристрій знаходяться на одній прямій, утворюючи перший канал. Додатково фотоприймальна матриця, яка розташована з боків смності, утворює другий канал, де також визначається інтенсивність розсіювання. Порівняння значень отриманих по двом каналам з еталонним діє кінцевий результат.

**Ключові слова** – фотометр; оптичні методи; інтенсивність світлового потоку; розсіювання; поглинання.

## ВСТУП

На сьогодні існує велика кількість застосувань оптичних методів у вимірюванні параметрів об'єктів. А саме контроль якості напівпродуктів, продуктів переробних та харчових виробництв, де під час технологічних процесів утворюються рідини, здатні розсіювати або поглинати видиме електромагнітне випромінювання [1]. Також оптичні методи вимірювання застосовуються під час різних процесів у медицині, машинобудуванні, хімічних та харчових галузях, де є потреба у контролі коефіцієнта пропускання рідини або газу.

Усі існуючі рішення мають спільні ознаки та відмінності. Насамперед, спільною ознакою є наявність джерела світла, фотоприймального елемента, блока порівняння. Кожен з конструктивних, технічних рішень має ряд переваг та недоліків, які розглянуто нижче.

## ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ

Як відомо [2], під час проходження електромагнітного випромінювання через розчин або дисперсне середовище, частина світлового потоку витрачається на поглинання, віддзеркалювання та розсіювання у речовині.

Головна відмінність між розчином та дисперсним середовищем полягає у розмірі домішок. Молекулярні розчини містять частки розміром менше  $10^{-9}$  м. Грубодисперсні - розмір часток більше  $10^{-6}$  м. Середньої дисперсності  $10^{-6}$  -  $10^{-7}$  м. Колоїдні дисперсні системи містять домішки  $10^{-7}$  -  $10^{-9}$  м. Для різних видів рідин використовуються різні методики вимірювання інтенсивності світлового потоку. Це пов'язано у першу чергу з фізичними властивостями, оскільки поведінка світлового променя буде визначатись, насамперед, довжиною хвилі освітлювача та розміром домішок.

Процес проходження світлової енергії через розчин (Рис.1) і дисперсне середовище (Рис.2) з товщиною поглинаючого шару  $W$ , де:

$I_{\text{вх.}}$  – інтенсивність вхідного світлового потоку;

$I_{\text{кюв.}}$  – інтенсивність світлового потоку, відбитого та поглиненого стінками кювети;

$I_{\text{погл.}}$  – інтенсивність світлового потоку, поглиненої непрозорим розчином;

$I_{\text{розс.}}$  – інтенсивність світлового потоку, розсіяного дисперсним середовищем;

$I_{\text{вих.}}$  – інтенсивність світлового потоку, який пройшов через досліджувану речовину.

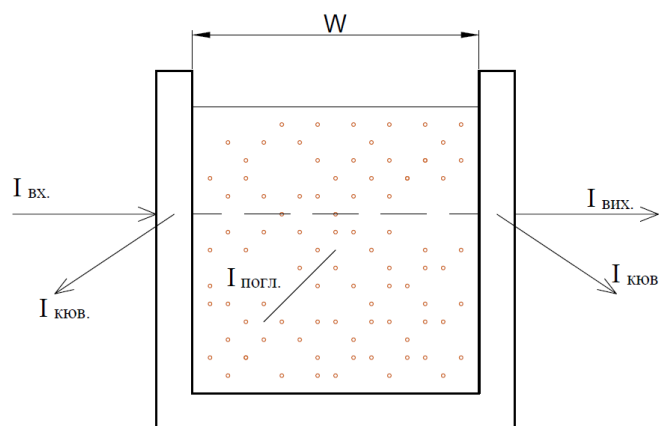


Рис. 1 Проходження світлового променя через розчин

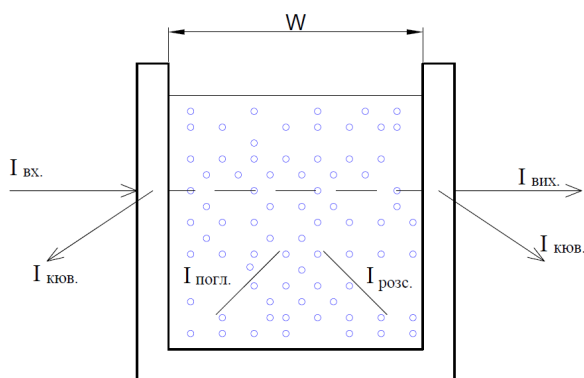


Рис. 2 Проходження світлового променя через дисперсне середовище

Інтенсивність світлового потоку, якщо не враховувати поглинання ємності, складається з наступних складових:

$$I_{\text{вх.}} = I_{\text{кюв.}} + I_{\text{погл.}} + I_{\text{вих.}} \text{ — для розчинів,}$$

$$I_{\text{вх.}} = I_{\text{кюв.}} + I_{\text{погл.}} + I_{\text{вих.}} + I_{\text{розс.}} \text{ — для дисперсного середовища.}$$

Зі зміною властивостей домішок змінюються складові інтенсивності світлового потоку і це можна використати для знаходження параметрів досліджуваного середовища [3]. Домішки різних розмірів будуть по різному розсіювати та поглинати електромагнітне випромінювання. Тому при точному вимірюванні значень  $I_{\text{погл.}}$  та  $I_{\text{розс.}}$  можна зробити висновок про кількість та розмір домішок.

Для визначення параметрів досліджуваної рідини використовують різні оптичні методи, що відрізняються видом взаємодії речовини з випромінюванням:

Турбідиметрія - метод аналізу, заснований на вимірюванні інтенсивності світла, яке пройшло через рідину.

Абсорбційна фотометрія – методи вивчення поглинання світлового потоку

Нефелометрія – методи, які вивчають розсіювання світла в об'єкті.

#### Турбідиметричний метод

Турбідиметричний метод виконує вимірювання зміни інтенсивності потоку світлової енергії на виході дисперсної системи. Метод схожий з колориметричним, але в ряді випадків вимірювання може відбуватися в потоці «білого світла» без застосування смугових фільтрів. Нефелометричний метод більш чутливий за турбідиметричний. У ньому невелика кількість зважених часток призводить до помітного зростання сигналу. Перевагою турбідиметричного методу є те, що вимірювання можна виконувати на будь-яких фотометрах та колориметрах.

#### Метод абсорбційної фотометрії

В основу абсорбційного методу аналізу покладено узагальнений закон Бугера - Ламберта – Бера [3]. Цей

закон визначає зміну інтенсивності світлового монохроматичного потоку при поширенні у досліджуваному середовищі.

$$I(w) = I_{\text{вх.}} \cdot e^{-k_{\lambda} w}, \quad (1)$$

де  $k_{\lambda}$  – показник поглинання,  $w$  - товщина,  $I_{\text{вх.}}$  – інтенсивність вхідного променя.

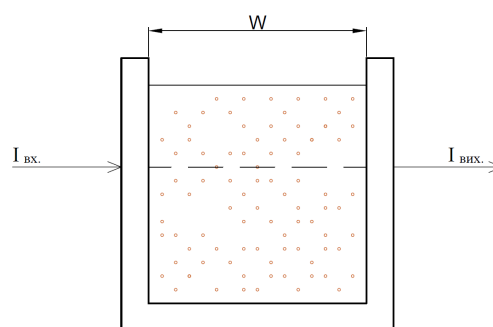


Рис. 3. Проходження світлового потоку через ємність з розчином

**Фотоколориметри** – пристрої, які визначають кількість пофарбованої речовини шляхом вимірювання величин поглинання і пропускання у видимій частині електромагнітного спектру. Загальна схема однопроменевого колориметра приведена на Рис.4.

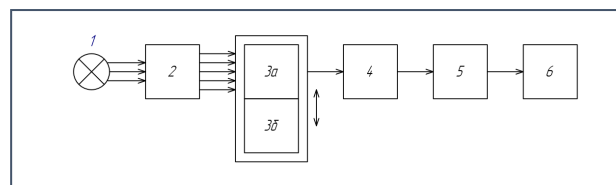


Рис. 4. Схема однопроменевого колориметра

1 - джерело випромінювання;

2 - оптична виборча система;

3а - досліджувані речовини;

3б - речовина порівняння;

4 - фотоприймальний блок;

5 - блок перетворення інформації;

6 - блок реєстрації та відображення інформації.

Принцип дії. Від джерела світловий потік проходить через оптичну виборчу систему ОВС (світлофільтр), де виділяється потрібна смуга світлового випромінювання. Після проходження через кювету з досліджуваним зразком або зразком порівняння, світловий потік надходить на фотоприймальний блок. Після перетворення сигналу в блоці, остаточний результат отримуємо на стрілочному приладі (в найпростіших моделях) або в цифровій формі на екрані спеціального дисплея в одиницях оптичної щільності (поглинання), пропускання або безпосередньо в одиницях концентрації досліджуваної рідини.

Спектрофотометри [4]. Основна відмінність спектрофотометра (Рис.5) від фотоколориметру полягає в можливості пропустити через досліджуваний зразок світловий потік будь-якої необхідної довжини хвилі; проводити фотометричні вимірювання, скануючи весь діапазон довжин хвиль не тільки видимого світла, але і ближнього ультрафіолету (200 до 380 нм). Метою режиму сканування є побудова спектральної кривої поглинання (абсорбції).

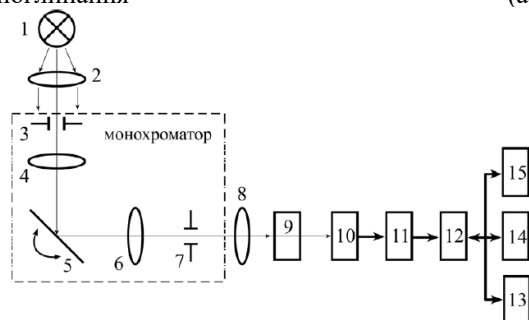


Рис. 5. Структурна схема одноканального спектрофотометра.

- 1 - джерело світлової енергії;
- 2 - оптична система, що направляє потік енергії на вхід;
- 3 - вхідна щілина;
- 4 - оптична система, що формує паралельний потік світлової енергії;
- 5 - призма або дифракційна решітка;
- 6 - оптична система, що направляє потік енергії на вихід;
- 7 - вихідна щілина;
- 8 - оптична система, що формує потік енергії, який проходить через кювету;
- 9 - кювета;
- 10 - фотоприймач;
- 11 - аналого-цифровий перетворювач;
- 12 - Мікро-ЕОМ;
- 13 - індикатор;
- 14 - пульт оператора;
- 15 - інтерфейс зв'язку із зовнішнім ЕОМ і реєструючим пристроєм.

Принцип роботи спектрофотометра. Поліхроматичне світло від джерела проходить через монохроматор, який розкладає біле світло на кольорні компоненти. Монохроматичне випромінювання з дискретним інтервалом в декілька нанометрів проходить через ту частину приладу, де розташовується зразок з досліджуваної пробою. Далі принцип роботи і пристрій спектрофотометра аналогічні колориметрам. В якості джерела видимого світла використовують галогенні лампи, які дають постійний потік світла в діапазоні 380-

950 нм. Як джерело УФ використовуються водневі або дейтерієві лампи.

### Нефелометрія

Нефелометричний аналіз [5] проводиться з метою визначення концентрації, розміру і форми частинок в дисперсних середовищах. Інтенсивність і напрям світлового потоку, розсіяного суспензією частинок, залежать від розміру частинок. Можна виділити два найбільш значущих випадки розсіювання світла. Релеєвське або симетричне (Рис.6) розсіювання має місце, коли розмір часток не перевищує 0,1 від довжини хвилі  $\lambda$ . Розсіювання Мі - коли розмір часток приблизно дорівнює довжині хвилі світлового потоку (Рис.7). Частинки великих розмірів розсіюють світло нерівномірно. Вперед - у напрямку потоку розсіюється більше світла, ніж у зворотному напрямку.

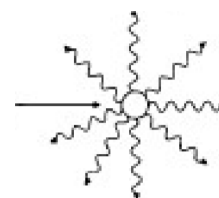


Рис. 6. Розсіювання світла при  $a < 0.12 \lambda$



Рис. 7. Розсіювання світла при  $a = 2 \lambda$

Апаратура для нефелометричних досліджень - це спектрофотометри, де вимірювання інтенсивності розсіяного світла виконується під кутом до напрямку падаючого на розчин світлового потоку. Довжини хвиль, які використовуються в більшості нефелометричних досліджень, знаходяться в діапазоні 340-650 нм.

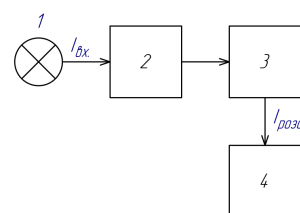


Рис. 8. Схема нефелометра

- 1 - джерело світлової енергії;
  - 2 - смуговий фільтр;
  - 3 - ємність;
  - 4 - фотоприймач;
- $I_{вх}$  - падаючий потік світлової енергії;  
 $I_{розс}$  - потік світлової енергії, розсіяний дисперсною системою.

### ОСНОВНА ЧАСТИНА

Для визначення розміру та концентрації домішок у речовині існує велика кількість різноманітних пристроїв, які базуються на описаних вище методах. Проте, перераховані вище рішення мають ряд недоліків, а саме:

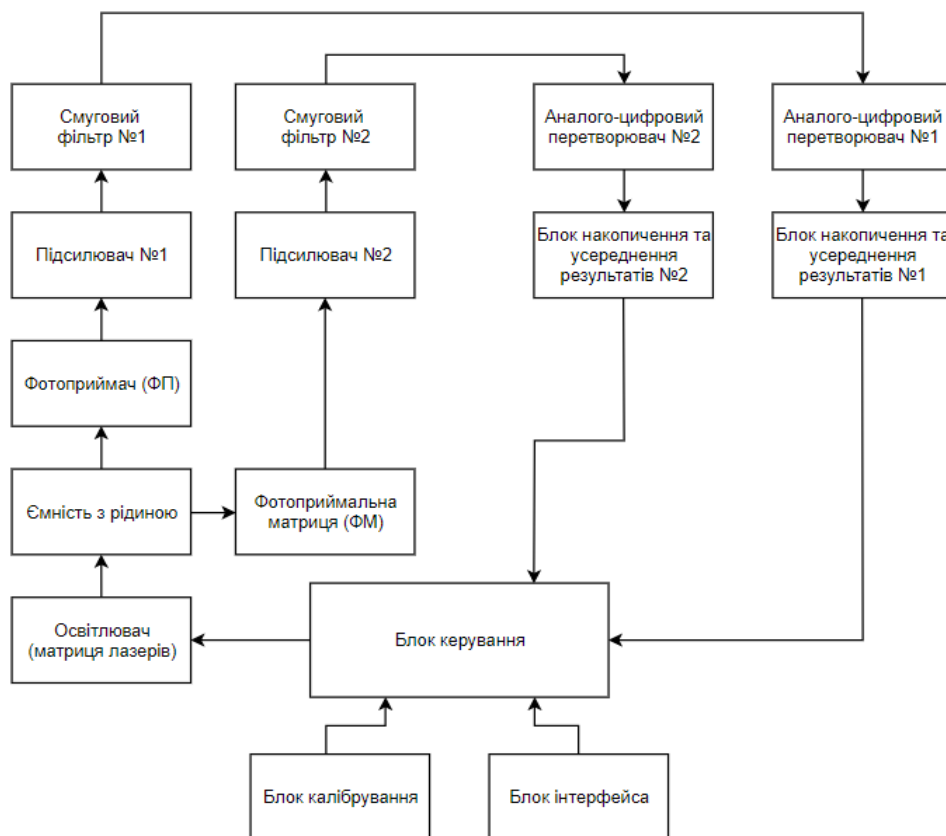
- більшість спектрофотометрів [4] базується на суб'єктивній оцінці оптичного коефіцієнту пропускання об'єкта контролю, що пов'язана із візуальною оцінкою рівності світлових потоків вимірювального і компенсаційного каналів. Цим самим не може бути забезпечено високу точність вимірювань;
- неможливість розділяти освітленість, створену сторонніми джерелами, від освітленості, створеної природним освітленням;
- при значному підвищенні концентрації контрольованої речовини в рідині керуючий сигнал, який подається на випромінювач, може

- обмежений діапазон виміру змісту речовин у воді, що характеризується значним світлопоглинанням.

Розглянуті недоліки вирішуються завдяки використанню модуляції світлового потоку, розширенню кількості каналів вимірювань, вибору лазерних матриць для джерела світла зі спрямованою характеристикою випромінювання в різних областях видимого спектра.

Головна ідея пристрою у поєднанні методів вимірювання. Принцип дії полягає у наступному (Рис.9).

В якості джерела світла використовуємо матрицю лазерів (червоного, синього, зеленого, фіолетового кольорів). Основною перевагою для вибору лазерів, в якості випромінювача, є те, що на виході буде отримано чіткий паралельний промінь світла, направлений на ємність з рідиною. Це дає змогу прибрати оптичний вузол, який використовується у фотометричних пристроях, що дозволяє збільшити точність вимірювання, оскільки енергія світлового променя не



досягти критичних значень і вивести з ладу джерело світла, знижуючи тим самим надійність пристрою при його використанні;

- наявність постійних засвічувань при вимірюваннях, що значно знижує точність результатів показань фотометра;
- відомі прилади мають велику похибку вимірювань і невисоку чутливість через втрати світла в системі формування світлового потоку та у вимірювальній камері;

буде розсіюватись на лінзах оптичного вузла.

Окремий для кожного оптичного каналу таймер генерує коливання з заданою частотою, які з виходів мікроконтролера поступають на матрицю лазерів. Світлові коливання з блоку монохроматичних освітлювачів йдуть на бокову поверхню ємності з досліджуванним середовищем, яке містить домішки, концентрацію та розмір яких потрібно дослідити.

Далі світло проходить крізь ємність на основний фотоприймач (ФП), а розсіяне домішками світло

потрапляє на фотоприймальну матрицю (ФМ), яка розташована навколо ємності та складається з високочутливих фотодіодів. Сигнали з ФП та ФМ підсилюються окремими операційними підсилювачами та передаються на смугові фільтри, які виділяють задану частоту. Фільтр складається з двох послідовно ввімкнутих смугових фільтрів, які прибирають стороннє освітлення. Таким чином, пристрій сприймає саме те світло, яке йде з освітлювача. Отримані сигнали потрапляють на входи аналого-цифрових перетворювачів. З кожного каналу відбувається зчитування значень вимірювань й виконується накопичення змінних. Результат вимірювання розраховується як середнє значення з усіх вимірів.

Мікроконтролер виконує обробку значень, а саме порівняння результатів двох каналів (ФП та ФМ) з еталонним значенням. Кінцевий результат надходить на блок інтерфейсу, для зчитування оператором.

### ВИСНОВКИ

Запропонована модель пристрою для вимірювання розміру та кількості домішок має збільшену чутливість приладу, яка обумовлена використанням матриці сучасних лазерів з різною довжиною хвилі. Оскільки, лампи накалювання, які використовують в якості джерела світла, мають кругову діаграму випромінювання то, як наслідок, є частина світлового потоку, яка не потрапляє на вимірювальну ємність. Також у наведеній моделі джерело електромагнітного випромінювання та фотоприймальний пристрій знаходяться на одній прямій, утворюючи перший канал для вимірювання інтенсивності вихідного світлового потоку. Таке розташування дає змогу зменшити втрати світла, які виникають при встановленні джерела та приймача під кутом  $90^{\circ}$ . Додаткова фотоприймальна матриця, яка розташована з боків ємності, утворює другий канал, де визначається інтенсивність розсіювання. Порівняння значень отриманих по двом каналам з еталонним дає кінцевий результат.

### ЛІТЕРАТУРА

- [1] H. Chanson, M. Takeuchi and M. Trevethen, "Using turbidity and acoustic backscatter intensity as surrogate measures of suspended sediment concentration in a small subtropical estuary," 2007.
- [2] A. A. Gershun, *Teoriya svetovogo polya: Izbrannyye trudy po fotometrii i svetotekhnike ITMO: Godyi i lyudi: Chast pervaya*, SPb., 2000, p. 284.
- [3] J. Estrany, G. Celso, Monitoring suspended sediment fluxes in the Na Borges basin, Mallorca, Spain, The Netherlands: Geomorphological Processes and Human Impacts in River Basins. IAHS Publ. 299., 2004, p. 117–122.
- [4] I. A. Schuplyak, *Spektrofotometr SF-46*, Leningrad, 1992.
- [5] I. O. Adamenko, V. H. Hubar, «Bahatokanalnyi vymiriuvach intensyvnosti svitlovoho potoku». Ukraina, Patent 123116, 12.02.2018.
- [6] P. D. Ankcorn, "Georgia Water Resources Conference," in *Clarifying turbidity — the potential and limitations as a surrogate for water-quality monitoring*, Athens, GA, 2003.
- [7] Y. D. Beliavskiy, T. A. Saurova, «Optimizatsiya preobrazovaniya energii v mnogoluchevoy avtofaznoy lampe begushey volnyi [Optimization of energy transformation in the multi-ray auto-phase traveling-wave tube],» *Tekhnika i Pribory SVCh*, № 1, pp. 3-7, 2010.
- [8] I. O. Adamenko, V. H. Hubar, «Systema dlia vyznachennia kontsentratsii domishok u dyspersnomu seredovyschi,» 2019.
- [9] Informpribor, «Analiticheskie pribory i pribory dlia nauchnykh issledovaniy,» № 4, 1984.
- [10] A. V. Karyakin, I. F. Gribovskaya, *Metody opticheskoy spektroskopii i lyuminestsentsii v analize prirodnykh i stochnykh vod*, Moskva: Himiya, 1987, p. 304.
- [11] I. O. Adamenko, V. H. Hubar, «Avtonomnyi tsyfrovyy prylad moduliatsiinoho typu dlia kontroliu protsesu sedymentsatsii, a takozh ekolohichnoho kontroliu chystoty ridyny,» Kyiv, 2019.
- [12] V. N. Kuzmin, "Izmereniye spektralnykh i spektrozonalnykh kharakteristik istochnikov opticheskogo izlucheniya," *Izvestiya vuzov. priborostroyeniye.*, no. 8, 2006.
- [13] M. N. Morozova, V. A. Solovyev, "Neyrokolorimetr na osnove tsifrovogo matrichnogo selectivnogo mnogoelementnogo fotopriyemnika," *Izmereniye. Monitoring. Upravleniye. Kontrol*, 2012.
- [14] O. K. Ushakov, E. Y. Kutenkova and A. N. Seryeznov, "Avtomaticheskiy kolorimetr na osnove optoelektronnykh preobrazovateley," *Interekspo Geo-Sibir*, 2012.