

СЕКЦІЯ 2
ОПТИЧНІ ТА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ПРИЛАДИ І СИСТЕМИ.
ФОТОНІКА

УДК: 535.243:620.179:66.0

**ОПТИЧНІ СПЕКТРАЛЬНІ МЕТОДИ КОНТРОЛЮ СКЛАДУ РЕЧОВИН ТА
ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У ПРОМИСЛОВОСТІ**

Денисюк В.Ю.

Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна

E-mail: v.denysiuk@lntu.edu.ua

Сучасний розвиток промисловості характеризується зростанням вимог до якості продукції, енергоефективності та безпеки технологічних процесів. У металургії, нафтохімії, енергетиці, фармацевтичній та інших галузях важливим завданням є оперативний контроль складу речовин і параметрів процесів, що безпосередньо впливають на кінцеві властивості продукції. Традиційні методи аналізу, такі як хімічні або хроматографічні, часто є трудомісткими, потребують значного часу та не забезпечують можливості безперервного контролю [1].

У цьому контексті особливого значення набувають оптичні спектральні методи, які базуються на аналізі взаємодії електромагнітного випромінювання з речовиною. Вони дозволяють отримувати інформацію про хімічний склад, концентрацію компонентів і фізичний стан об'єкта дослідження. Використання сучасних спектрометричних систем, у поєднанні з волоконно-оптичними каналами передачі сигналів, відкриває можливості для реалізації безконтактного, високошвидкісного та точного контролю безпосередньо в умовах виробництва, включаючи екстремальні середовища [2, 3].

Актуальність застосування оптичних спектральних методів контролю зумовлена необхідністю забезпечення високої якості продукції та підвищення ефективності технологічних процесів у реальному часі [4, 5]. У багатьох галузях промисловості, зокрема при виплавці металів, контролі процесів горіння, виробництві лікарських засобів і переробці нафти, існує потреба у швидкому та достовірному визначенні складу речовин і виявленні відхилень від заданих параметрів. Особливу складність становить контроль процесів, що протікають в екстремальних умовах (високі температури, вакуум, агресивні середовища), де застосування контактних методів є обмеженим або неможливим. У таких умовах безконтактна оптична спектроскопія є одним із найбільш перспективних підходів. Крім того, сучасні тенденції цифровізації виробництва (Industry 4.0) вимагають інтеграції сенсорних систем у автоматизовані системи керування, що також підвищує значущість швидкодіючих спектральних методів контролю [6, 7].

Метою даної роботи є аналіз та узагальнення можливостей оптичних спектральних методів контролю складу речовин і параметрів технологічних процесів у різних галузях промисловості, а також визначення вимог до технічних засобів їх реалізації.

Контроль хімічного складу металів і сплавів у процесі їх виплавки є ключовим етапом забезпечення якості металопродукції. Саме на основі такого контролю визначається вміст домішок і легуючих компонентів, а також встановлюється точний елементний склад матеріалу. Отримана інформація дозволяє не лише оцінити ступінь чистоти металу, але й прогнозувати експлуатаційні властивості майбутніх виробів, зокрема їх міцність, зносостійкість, корозійну стійкість та надійність у різних умовах роботи. Таким чином, ефективний контроль складу є невід’ємною складовою сучасних металургійних технологій і важливим чинником підвищення конкурентоспроможності продукції.

В даний час для визначення складу металів, що виплавляються, застосовується низка аналітичних методів, кожен з яких має свої особливості, переваги та обмеження. Спектральний аналіз передбачає збудження атомів досліджуваної речовини електричним розрядом або високотемпературним джерелом з подальшою реєстрацією спектра емісійного випромінювання. Більшість аналітичних спектральних ліній металів розташована в ультрафіолетовому та видимому діапазонах (приблизно 200-520 нм), що робить цей метод особливо ефективним для швидкого визначення складу.

Більшість традиційних методів контролю складу металів і сплавів, незважаючи на їх високу точність і достовірність, мають суттєве обмеження – відсутність можливості здійснення безперервного контролю в режимі реального часу. Це ускладнює оперативне керування технологічними процесами та своєчасне виявлення відхилень, що може призводити до погіршення якості кінцевої продукції. У цьому контексті особливо перспективним є застосування оптичного спектрального методу, який дозволяє реалізувати безконтактний контроль складу металів безпосередньо під час їх виплавки. Такий підхід базується на аналізі спектра випромінювання, що генерується досліджуваним об’єктом, і дає можливість отримувати інформацію про його склад у реальному часі. Порівняльний аналіз існуючих методів показує, що оптична спектроскопія поєднує в собі високу швидкість вимірювань, достатню точність і можливість неруйнівного контролю. Особливої ефективності цей метод набуває при використанні безконтактних схем вимірювання, що є критично важливим для контролю високотемпературних процесів.

Однією з найбільш складних і відповідальних областей застосування є вакуумно-дугове переплавлення металів, зокрема отримання зливків тугоплавких матеріалів. Відомо, що для формування монокристалічної структури необхідно здійснювати повторне переплавлення металу в умовах глибокого вакууму (тиск

менше 1 Па), що дозволяє уникнути утворення дефектів, таких як пористість. При цьому важливу роль відіграє точне дотримання складу сплаву, зокрема контроль вмісту легуючих елементів, який безпосередньо впливає на експлуатаційні характеристики матеріалу.

Процеси плавлення тугоплавких металів (титан, вольфрам, молібден, нікель тощо), що відбуваються при температурах понад 2000 °С, супроводжуються екстремальними умовами, які значно ускладнюють застосування традиційних контактних методів вимірювання. У зв'язку з цим виникає необхідність впровадження безконтактних методів контролю, здатних працювати в умовах високих температур, вакууму та інтенсивних електромагнітних впливів.

Оптичний спектральний контроль може також виконувати функції елементу системи безпеки. Зокрема, поява у спектрі ліній матеріалу кристалізатора (наприклад, міді) свідчить про аварійну ситуацію та потребує негайного втручання. Це обумовлює необхідність забезпечення високої швидкодії системи (час реакції менше 0,1 с), високої спектральної роздільної здатності та стійкості до впливу несприятливих факторів середовища. Застосування волоконно-оптичних систем передачі (ВОСП) сигналу дозволяє віддалити вимірювальне обладнання від зони високих температур і підвищити безпеку експлуатації. При цьому найбільш доцільним є використання спектральних приладів із дифракційними решітками, які забезпечують широкий спектральний діапазон досліджень та високі метрологічні характеристики порівняно з іншими типами аналізаторів. Таким чином, безконтактні оптичні спектральні методи є ефективним засобом вирішення задач контролю процесів виплавки металів в екстремальних умовах, забезпечуючи високу інформативність, оперативність і надійність вимірювань.

Одним із ключових напрямів сучасних хіміко-фізичних досліджень є аналіз процесів горіння, у межах якого спектроскопічні методи зарекомендували себе як одні з найбільш інформативних і ефективних інструментів діагностики. Це зумовлено тим, що випромінювання полум'я несе значний обсяг інформації про хімічний склад і фізичний стан реагуючої системи. Зокрема, суцільне випромінювання полум'я переважно зосереджене у довгохвильовій області спектра ($\lambda > 500$ нм), тоді як наявність молекулярних смуг у спектрі обумовлена продуктами згорання, такими як CO_2 , H_2O , CO , OH , CH , C_2 . У випадках, коли до складу палива або окислювача входять азотовмісні сполуки, у спектрі можуть додатково спостерігатися смуги молекул NO , NH , CN . Аналіз спектральних характеристик полум'я дає змогу не лише ідентифікувати хімічний склад продуктів згорання, але й здійснювати активне керування процесом горіння. Зокрема, за інтенсивністю та положенням спектральних ліній можна оптимізувати співвідношення компонентів паливно-окислювальної суміші, що сприяє підвищенню ефективності згорання, зниженню шкідливих викидів та покращенню енергетичних показників системи.

Особливу цінність спектроскопічні методи мають при дослідженні кінетики складних хімічних реакцій, що супроводжують процес горіння. У таких системах постійно утворюються та зникають проміжні активні частинки, час існування яких є надзвичайно малим. Традиційні методи хімічного аналізу часто не дозволяють зафіксувати такі короткоживучі компоненти, тоді як спектроскопія забезпечує можливість їх оперативної ідентифікації, визначення концентрацій та аналізу їх ролі у механізмах реакцій. У якості засобу контролю в даному випадку виступає спектральний прилад, який реєструє електромагнітне випромінювання полум'я та інтерпретує його як інформативний сигнал про стан процесу горіння. Для забезпечення високої точності аналізу такі прилади повинні мати значну спектральну роздільну здатність, що дозволяє чітко розрізняти окремі спектральні лінії та смуги.

З огляду на те, що процеси горіння відбуваються при високих температурах і часто в агресивних середовищах, контроль їх параметрів повинен здійснюватися в умовах, наближених до екстремальних. Це обумовлює доцільність використання безконтактних методів вимірювання. Одним із найбільш ефективних підходів є застосування ВОСП, які дозволяють передавати випромінювання від зони горіння до спектрального приладу на безпечну відстань. Такий підхід підвищує надійність і безпеку вимірювань, а також забезпечує можливість реалізації безперервного моніторингу процесів горіння в реальному часі.

Проблема виявлення фальсифікованої фармацевтичної продукції, а також забезпечення належного контролю виробництва лікарських форм і вихідної сировини, є надзвичайно актуальною як з наукової, так і з практичної точки зору. Одним із найбільш надійних і поширених методів контролю якості лікарських засобів на сьогодні є інфрачервона (ІЧ) спектроскопія. Її перевага полягає у високій специфічності, що дозволяє однозначно ідентифікувати хімічні сполуки за характерними смугами поглинання. Еталонні ІЧ-спектри речовин, які використовуються у виробництві лікарських препаратів, регламентуються державною фармакопеею, що визначає вимоги до якості фармацевтичних субстанцій та готових лікарських форм.

Під час проведення аналізу отриманий спектр досліджуваного зразка повинен повністю відповідати еталонному як за положенням смуг поглинання на шкалі довжин хвиль (частот), так і за їх інтенсивністю. Відхилення у положенні спектральних максимумів може свідчити про заміну активної речовини на іншу, дешевшу сполуку або про її повну відсутність. У свою чергу, зміна інтенсивності смуг поглинання є ознакою невідповідності концентрації діючої речовини встановленим нормам. Порівняльний аналіз спектрів оригінальних та фальсифікованих препаратів наочно демонструє відмінності у їх спектральних характеристиках, що дозволяє ефективно ідентифікувати підробки (рис. 1). Водночас достовірність такого аналізу значною мірою залежить від технічних

характеристик вимірювального обладнання, зокрема його спектральної роздільної здатності та чутливості.

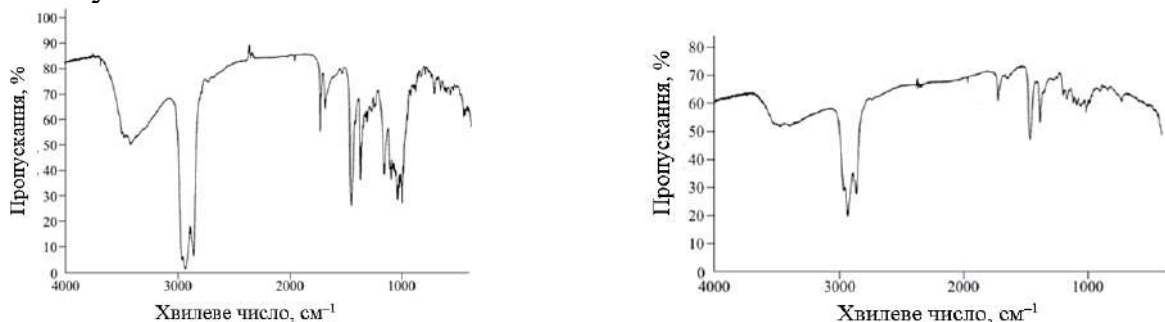


Рис. 1. Спектр оригінального та підробленого лікарського препарату:
а) оригінальний препарат; б) підроблений препарат

Отже, забезпечення високоточного контролю якості лікарських засобів і сировини потребує застосування сучасних спектральних приладів, здатних виконувати вимірювання з високою роздільною здатністю. Це дозволяє підвищити ефективність виявлення фальсифікованої продукції, забезпечити відповідність фармацевтичних препаратів встановленим стандартам та гарантувати їх безпечність і ефективність для споживача.

Сучасні технологічні процеси переробки нафти характеризуються багатостадійністю, де продукти однієї стадії використовуються як сировина для наступної. Це обумовлює необхідність організації безперервного контролю якості у режимі реального часу з метою своєчасної оптимізації технологічних параметрів та підвищення ефективності виробництва. Одним із перспективних напрямів є використання інфрачервоної спектроскопії у поєднанні з ВОСП сигналів. Завдяки сучасним досягненням у галузі волоконної оптики, передача оптичного випромінювання може здійснюватися на значні відстані без суттєвих втрат, що дозволяє реалізувати дистанційний контроль у складних або небезпечних виробничих умовах.

Практична реалізація такого підходу передбачає застосування проточних вимірювальних модулів, через які пропускається досліджуваний нафтопродукт. У цьому випадку випромінювання від широкосмугового джерела світла вводиться у волоконно-оптичний тракт і спрямовується до вимірювальної кювети, де відбувається взаємодія з досліджуваним середовищем. Після проходження через зразок сигнал повертається до детектора, де здійснюється реєстрація спектра поглинання, його обробка та визначення необхідних фізико-хімічних характеристик (рис. 2).

Такий підхід забезпечує можливість безперервного моніторингу складу нафтопродуктів у реальному часі, проте висуває підвищені вимоги до характеристик вимірювального обладнання.

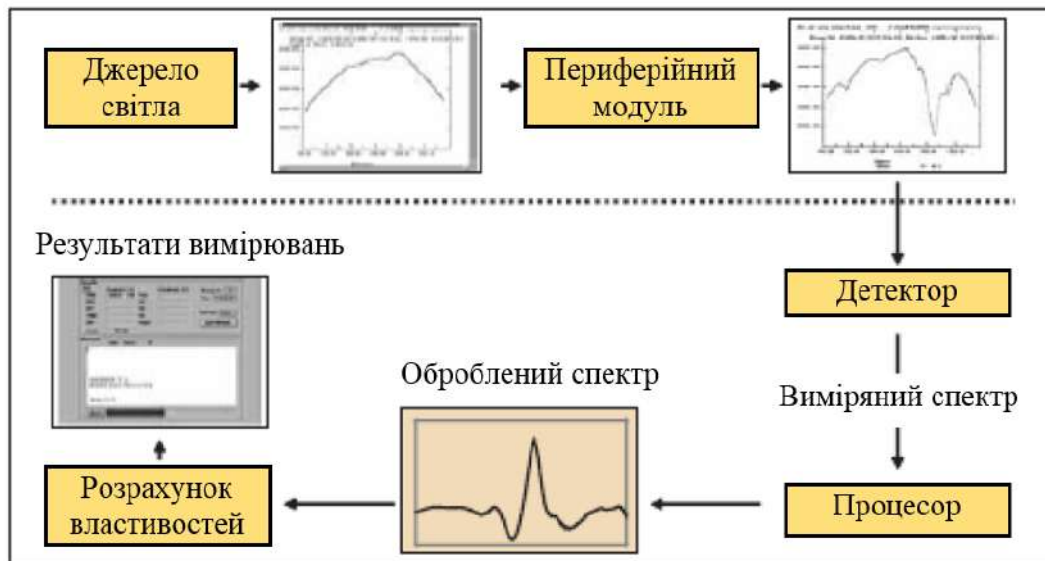


Рис. 2. Схема вимірювання спектра

Зокрема, спектральні прилади повинні мати високу роздільну здатність для точного розрізнення спектральних особливостей складних сумішей, а також високу чутливість і широкий динамічний діапазон для компенсації втрат сигналу у волоконно-оптичному тракті. Таким чином, застосування оптичних спектральних методів у нафтохімічній галузі відкриває широкі можливості для підвищення ефективності контролю якості продукції, автоматизації технологічних процесів та забезпечення їх стабільності в умовах сучасного виробництва.

Традиційні методи аналізу, незважаючи на їх високу точність, мають суттєві обмеження, пов'язані з тривалістю вимірювань, складністю реалізації та відсутністю можливості безперервного контролю в режимі реального часу. Впровадження спектральних систем контролю у поєднанні з волоконно-оптичними каналами передачі сигналів дозволяє реалізувати безперервний моніторинг технологічних процесів, підвищити рівень їх автоматизації та безпеки, а також забезпечити своєчасне виявлення відхилень від заданих параметрів. Отже, оптичні спектральні методи контролю є перспективним напрямом розвитку інформаційно-вимірювальних систем, що відповідає сучасним вимогам цифровізації промисловості та концепції Industry 4.0. Подальші дослідження доцільно спрямувати на підвищення точності та швидкодії спектральних систем, розроблення інтелектуальних алгоритмів обробки спектральних даних, а також інтеграцію таких систем у автоматизовані комплекси керування технологічними процесами.

Ключові слова: оптична спектроскопія, контроль, спектральний метод, технологічні процеси, вимірювання.

Література

- [1] О. В. Афанасьєва, Ю. С. Курський, Є. М. Одаренко, *Оптичні вимірювання: навч. посіб.* Харків: ХНУРЕ, 2021. Ч.1.

- [2] І. В. Солтис *Техніка спектроскопії: навч. посіб.* Чернівці: ЧНУ, 2022.
- [3] Д. О. Мельничук, С. Д. Мельничук, В. М. Войціцький, *Аналітичні методи досліджень. Спектроскопічні методи аналізу: теоретичні основи і методику: навч. посіб.* Київ: Компринт, 2016.
- [4] В. Ю. Денисюк «Аналіз методів оптичної спектроскопії для завдань контролю на базі вимірювання оптичних спектрів». *«Приладобудування: стан і перспективи»*: зб. матер. XXIV Міжнар. наук.-техн. конф. (м. Київ, 13-14 трав. 2025 р.). Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, с. 52-56. 2025.
- [5] В. Ю. Денисюк, «Аналіз області застосування оптичного спектрального методу контролю у металургії». *«Прогресивні напрямки розвитку автоматизованих технологічних комплексів»*: зб. наук. праць VIII Міжнар. наук. техн. конф. ТК-2024 (м. Луцьк, 28-30 трав. 2024 р.). Луцьк: ЛНТУ, с. 57- 58, 2024.
- [6] Я. І. Лепіх, В. І. Сантоній, Л. М. Будіяньська, *Оптико-електронні системи ближньої локації: монографія.* Одеса: Одес. нац. ун-т ім. І.І. Мечникова, 2019.
- [7] В. Ю. Денисюк, В. В. Пташенчук, «Аналіз методів метрологічного забезпечення високоточного контролю похибок механічних пристроїв переміщень об'єктів». *«Перспективні технології та прилади»*: зб. статей. Вип. 21. с. 20-25, 2022.

УДК 621.384.3

АРХІТЕКТУРА ГЕТЕРОГЕННОЇ МУЛЬТИСЕНСОРНОЇ СИСТЕМИ ВИЯВЛЕННЯ БПЛА З ВИКОРИСТАННЯМ АДАПТИВНОГО ЗЛИТТЯ ДАНИХ НА РІВНІ РІШЕНЬ

Танчук В.С., Колобродов В.Г.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

E-mail: tanchuk.vladislav@gmail.com, thermo@ukr.net

Вступ

Стрімкий розвиток технологій безпілотних літальних апаратів (БПЛА) створює нові виклики для систем безпеки та моніторингу повітряного простору. Сучасні FPV дрони характеризуються малою ефективною площею розсіювання (ЕПР), низькими польотами та слабкою акустичною сигнатурою. Це робить традиційні системи виявлення, такі як радіолокаційні станції (РЛС), вразливими до «сліпих зон» та хибних результатів виявлення.

Альтернативними методами виявлення є оптико-електронні та інфрачервоні (ІЧ) системи, які фіксують візуальні контури та тепловий слід БПЛА. Проте камери видимого діапазону критично залежать від освітленості сцени, а тепловізори, в свою чергу, мають дуже високу вартість, якщо розглядати варіанти з високою роздільною здатністю та широким полем зору. Це ускладнює їх використання для ефективного кругового слідкування. Вирішенням цієї проблеми є створення гетерогенних мультисенсорних систем.