

САФТЮК ЯРОСЛАВ

Вінницький національний аграрний університет

<https://orcid.org/0009-0003-9730-7198>e-mail: groupyaruslav@gmail.com

СУЧАСНІ РІШЕННЯ ТА РОЗВИТОК ОСНОВНИХ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ МАСОВОЇ ЧАСТКИ СІРКИ В НАФТОВИХ ПАЛИВАХ

В роботі наведено результати досліджень щодо сучасних рішень та напрямків розвитку основних засобів вимірювання масової частки сірки в нафтових паливах. До них можна віднести різні методи аналізу, системи моніторингу, а також пристрої для визначення вмісту сірки з метою забезпечення відповідності палива екологічним та технічним стандартам. Відмічено, що перспективним напрямком розвитку цього сектора є впровадження автоматизованих систем аналізу, інтеграція з цифровими платформами та використання штучного інтелекту для підвищення точності та ефективності вимірювань. Особливу увагу приділено також мініатюризації обладнання та розвитку систем моніторингу, що дозволяє здійснювати безперервний контроль якості палива в реальному часі.

Крім того, відзначено важливість розробки екологічно безпечних та енергоефективних методів вимірювання, що відповідають сучасним вимогам до зменшення викидів шкідливих речовин та підвищення енергоефективності процесів.

Ключові слова: вимірювання сірки, нафтові палива, аналітичні методи, автоматизація, цифрові системи, екологічні стандарти, точність аналізу, системи контролю якості.

SAFTIUK YAROSLAV

Vinnytsia National Agrarian University

MODERN SOLUTIONS AND DEVELOPMENT OF BASIC METHODS AND MEANS OF MEASURING SULFUR BY MASS IN PETROLEUM FUELS

One of the most progressive directions in the oil refining industry is the accurate measurement of the mass fraction of sulfur, which is a complex process of controlling the quality of fuel in accordance with their requirements and standards. The development of these technologies was made possible by advances in analytical systems, sensor technologies, and automation of measurement processes. A key component of modern sulfur measurement is the development and adaptation of strategies and methods to accurately and reliably estimate fuel sulfur content. The focus is on measuring, understanding, and applying factors that affect sulfur content, such as fuel composition, processing technologies, environmental regulations, and quality control standards.

The purpose of this work is to research innovative, modern solutions and directions for the development of basic devices for measuring the mass fraction of sulfur in petroleum fuels, which contribute to the adoption of reasonable management decisions to ensure fuel quality and compliance with environmental standards. The study emphasizes that measuring sulfur content is an integral part of comprehensive quality management systems that involve the use of integrated analytical methods rather than individual methods. Thanks to the rapid development of information technology, based on innovative advances in spectroscopy, sensor systems, data processing algorithms and automation, solutions have been developed that combine all elements of sulfur measurement into unified and efficient systems.

Among the modern solutions and directions of development of systems for measuring sulfur content are the use of advanced spectroscopic methods with high accuracy and speed of analysis; use of automated sensor systems for continuous monitoring of sulfur levels in real time.

Keywords: sulfur measurement, petroleum fuels, analytical methods, automation, digital systems, environmental standards, analysis accuracy, quality control systems.

Постановка проблеми

Вимірювання масової частки сірки в нафтовому паливі є критично важливим аспектом контролю якості та екологічної безпеки в нафтопереробній промисловості. Сірка в паливі впливає на ефективність процесів горіння, викликає утворення шкідливих викидів, таких як оксиди сірки (SO_x), які є основними забруднювачами атмосфери та сприяють утворенню кислотних дощів. Крім того, високий вміст сірки може негативно вплинути на обладнання, викликаючи корозію та скорочуючи термін служби машин.

Враховуючи посилення екологічних норм і стандартів якості палива, зростає потреба у впровадженні точних, надійних і ефективних методів вимірювання масової частки сірки. Однак існуючі методи часто мають обмеження щодо точності, швидкості аналізу, споживання енергії та вартості обладнання. Крім того, зростає попит на автоматизацію процесів контролю якості.

Основним завданням даної роботи є дослідження сучасних рішень і напрямків розвитку основних засобів вимірювання масової частки сірки в нафтових паливах. Це включає в себе аналіз існуючих методів вимірювання, їх переваг і недоліків, а також вивчення новітніх технологій, які дозволяють підвищити точність, швидкість і ефективність процесів аналізу. Особливу увагу буде приділено впровадженню автоматизованих систем, сенсорних технологій, цифрових платформ і алгоритмів штучного інтелекту, які сприяють оптимізації процесів вимірювання та забезпечують відповідність палива екологічним і технічним стандартам.

Аналіз досліджень та публікацій

Фундаментальною частиною розвитку засобів вимірювання вмісту сірки в нафтових паливах є розробка нових методів і засобів, які б відповідали міжнародним стандартам, а також вдосконалення вже існуючих [1]. Ключовим у цьому підході є розуміння вимог міжнародних стандартів до точності та надійності вимірювань, а також практичне застосування новітніх технологій для досягнення цих вимог. Вдосконалення існуючих методів також передбачає підвищення їх енергоефективності, зменшення вартості аналізу та покращення портативності пристроїв, що особливо важливо для польових умов та віддалених місць [3].

З практичної точки зору ми бачимо, що існуючі засоби вимірювання вмісту сірки в нафтових паливах не є настільки застарілими, наскільки потребують певного вдосконалення для розширення можливості їх застосування. Одним із напрямків вдосконалення є підвищення портативності та мобільності обладнання, що дозволить проводити аналіз у польових умовах або на віддалених об'єктах без необхідності транспортування проб до лабораторій. Це особливо важливо для оперативного контролю якості палива під час його виробництва та транспортування. Крім того, оптимізація алгоритмів обробки даних і впровадження автоматизованих систем аналізу дозволяє скоротити час проведення аналізу та знизити ймовірність людських помилок. Також важливо розширити діапазон вимірювань, забезпечуючи можливість аналізу різних типів нафтових продуктів з різними концентраціями сірки. Це може бути досягнуто шляхом калібрування обладнання для роботи з різними зразками та впровадження універсальних сенсорів, які здатні адаптуватися до змінних умов аналізу. Такий підхід дозволить використовувати існуючі методи в більш широкому спектрі застосувань, включаючи аналіз біопалив, синтетичних рідинних палива та інших альтернативних джерел енергії [5][6].

Формулювання цілей статті

Метою роботи є: всебічний аналіз сучасних методів та засобів вимірювання масової частки сірки в нафтових паливах, а також визначення основних напрямів їх розвитку та вдосконалення.

Виклад основного матеріалу

Швидкий науково-технічний прогрес і стрімкий розвиток різних галузей науки та світової економіки в 20 столітті спричинили значне збільшення споживання природних ресурсів, серед яких нафтопродукти набули особливої важливості. Завдяки своїм універсальним властивостям нафтові палива стали основою світової енергетичної системи, визначаючи напрямки розвитку технологій і економічних процесів у багатьох країнах світу[1].

З 1970 по 2023 роки світове споживання нафтового палива значно зросло, що відображає швидке зростання світової економіки та збільшення попиту на енергію. У 1970-х роках нафта вже була основним джерелом енергії, але після нафтових криз тих років відбулися значні коливання споживання. З 1980-х років світове споживання нафти неухильно зростало, досягнувши пікових показників на початку 21 століття. Незважаючи на зусилля з розвитку альтернативних джерел енергії, нафта залишається важливим енергетичним ресурсом, на який припадає значна частина світового енергетичного балансу [2].

Органічні сполуки сірки є природними компонентами сирої нафти. Під час термічної обробки нафти ці сполуки можуть переходити в нафтопродукти у різних кількостях. Їх наявність є небажаною, оскільки вони можуть викликати неприємний запах, призводити до корозії обладнання та забруднення атмосфери під час згоряння. Крім того, ці сполуки завдають шкоди дорогим каталізаторам, які використовуються в процесах переробки нафти, а утворені при спалюванні оксиди сірки спричиняють серйозні екологічні проблеми [3][4].



Рис. 1. Методи визначення сірки в нафтових паливах

Високий вміст сірки призводить до сильного забруднення продуктів згоряння палива двоокисом сірки SO_2 . За наявності надлишку повітря відбувається часткове окислення SO_2 до SO_3 (з'єднуючись з H_2O , утворюючи H_2SO_4). H_2SO_4 викликає корозію поверхні нагріву, шкідливо діє на живі організми та рослинність.

Контроль вмісту сірки в нафтовому паливі є важливим аспектом забезпечення якості палива та захисту навколишнього середовища. Сьогодні існує багато методів визначення вмісту сірки в нафтопродуктах. У зв'язку з цим існує постійна потреба в методах, що дозволяють швидко і точно визначити вміст сірки [5].

Для отримання інформації про досліджувану речовину використовуються такі параметри, як оптичні та електричні властивості, іонізуюче випромінювання, кількість продуктів хімічних реакцій, а також зміна кольору індикаторів. Оптичні параметри, включаючи інтенсивність світлового випромінювання, коефіцієнти заломлення, поглинання та розсіювання, визначаються в результаті поглинання світла речовиною у видимому,

ультрафіолетовому або інфрачервоному діапазонах спектра. При хімічній реакції сірка утворює сполуку, кількість якої легко піддається вимірюванню і служить важливим показником. Крім того, значущими є електричні характеристики, параметри іонізуючого випромінювання та зміни кольору індикаторів [6].

Найпопулярніші методи, на основі яких будуються технічні засоби вимірювання масової частки сірки в нафтових паливах, наведені на (рис. 1).

Рентгенівська флуоресценція (РФ) є одним із ключових аналітичних методів, які широко використовуються для визначення елементного складу різних матеріалів, у тому числі нафтового палива. У РФ методі первинне рентгенівське випромінювання спрямовується на зразок. В результаті частина рентгенівського випромінювання розсіюється зразком (розсіювання Комптона і Томпсона), частина проходить через нього, а частина поглинається зразком і призводить до генерації вторинного рентгенівського випромінювання – рентгенівської флуоресценції. Вторинне рентгенівське випромінювання містить у своєму спектрі компоненти, характерні для хімічних елементів, що входять до складу проби. Положення та інтенсивність аналітичних ліній (якісний та кількісний аналіз) реєструють за допомогою спектрометричної частини приладів XRF. Сучасне аналітичне обладнання для рентгенівської дифракції дозволяє визначати всі елементи періодичної системи, починаючи з сірки. Типові межі виявлення для більшості елементів 10-4...10-2 маси. %, а максимальна визначена концентрація може становити 100 % [7].



Рис. 2. Енергодисперсійний рентгенофлуоресцентний аналізатор сірки Petra

Сучасні РФ спектрометри можна розділити на дві групи, які відрізняються, перш за все, методом селекції та реєстрації аналітичного сигналу. До першої групи належать спектрометри з дисперсією довжини хвилі. У цих спектрометрах флуоресцентне випромінювання зразка, відібраного під певним кутом, потрапляє на кристал-аналізатор, на якому відповідно до умов здійснення дифракції Брегга відбирається випромінювання із заданою довжиною хвилі і направляється на систему детектування.

До другої групи належать спектрометри з дисперсією випромінювання зразка за енергією (енергодисперсійні спектрометри). Такі спектрометри мають напівпровідникові детектори, здатні розрізняти енергії квантів рентгенівського випромінювання, що виходять безпосередньо із зразка [8].

Енергодисперсійний рентгенофлуоресцентний аналізатор сірки Petra зображений на (Рис. 2). На додаток до визначення сірки відповідно до ASTM D 4294, аналізатор Petra визначає 12 інших елементів від фосфору до цинку на рівні частин на мільйон. Тут використовується сучасна монохроматична і фокусуюча оптика. Це дозволяє значно підвищити співвідношення сигнал/шум у порівнянні з традиційною поліхроматичною рентгенівською флуоресценцією [9].

Інфрачервона спектроскопія (ІС) є одним із ключових аналітичних методів, які широко використовуються для визначення хімічного складу різних матеріалів, у тому числі нафтового палива. ІС заснована на поглинанні інфрачервоного випромінювання молекулами зразка. Кожен хімічний зв'язок у молекулі має характерні частоти поглинання, що відповідають коливальним рухам атомів. Коли інфрачервоне світло проходить через зразок, деякі частоти поглинаються, а інші проходять незмінними.



Рис. 3. NACH-LANGE DR 2800 — портативний спектрофотометр з використанням (FTIR)

Отриманий спектр поглинання є унікальним для кожної хімічної сполуки і може бути використаний для визначення її концентрації в зразку. Як правило, ІС з перетворенням Фур'є (FTIR) використовується для отримання високої ефективності.

FTIR – це техніка, яка використовується для запису інфрачервоних спектрів, отриманих від аналізованого твердого, твердого та газоподібного зразка. FTIR-спектрометри все частіше використовуються

для збору даних високої спектральної роздільної здатності в середньому та ближньому ІЧ-діапазонах. Частота середнього ІЧ-діапазону лежить між 5000 і 400 cm^{-1} , ближнього ІЧ-діапазону лежить між 10000 і 4000 cm^{-1} [10].

За допомогою спектрофотометра HACH-LANGE DR 2800 можна виконувати кількісний аналіз сірки в нафтопродуктах, використовуючи спеціальні методи і реагенти для тестування (Рис. 3). Використовуючи спектрофотометр DR 2800, можна точно визначити концентрацію сірки в паливі та інших нафтопродуктах з великою точністю [10].

Мас-спектрометрія з індуктивно-зв'язаною плазмою — це високочутливий аналітичний метод, який використовується для визначення вмісту елементів, включаючи сірку, у складних зразках, таких як нафтопродукти. Принцип дії полягає в тому, що зразки вводяться в плазму, нагріту до температури близько 10 000°C. Під впливом такої високої температури атоми зразка іонізуються, перетворюючись на заряджені частини (іони). Іони спрямовуються в мас-спектрометр, де вони розділяються за масою заряду (m/z) за допомогою електричного та магнітного полів. процес дозволяє точно виміряти кожен елемент у цьому зразку. Характеризується надзвичайно високою чутливістю, що дозволяє визначати вміст елементів на рівні частин на трильйон (ppt).

Мас-спектрометрія з індуктивно пов'язаною плазмою широко використовується в нафтовій промисловості для аналізу сірки, після чого можна точно виміряти вміст сірки навіть за низьких концентрацій.

Однією з ключових переваг є можливість одночасного визначення багатьох елементів у зразку. Метод є інструментом контролю якості палива, де вміст сірки суворо регламентується екологічними стандартами [11].

Agilent 7900 ICP-MS від компанії Agilent Technologies — високопродуктивна система мас-спектрометрії з індуктивно-зв'язаною плазмою, розроблена для точного аналізу слідових кількостей елементів у різних зразках (Рис. 4). Ця модель забезпечує надзвичайну чутливість із межею виявлення до 1 ppt (частка на трильйон), що дозволяє проводити надточні вимірювання в різноманітних галузях промисловості.



Рис. 4. Agilent 7900 ICP-MS від компанії Agilent Technologies

Електрохімічні методи визначення сірки в нафтових паливах засновані на використанні електрохімічних реакцій для ідентифікації і кількісного аналізу сірковмісних сполук. Основний принцип полягає в окисненні або відновленні сірковмісних сполук з подальшим вимірюванням електрохімічних характеристик, таких як струм або потенціал. Для цього використовуються електроди, які можуть бути виготовлені з платини, вуглецю або інших матеріалів, що забезпечують високу стабільність і точність результатів.

Ці методи дозволяють визначати низькі концентрації сірки з високою чутливістю. Однією з переваг електрохімічних методів є їх відносна простота і можливість автоматизації процесу. Вони також можуть бути використані для постійного моніторингу вмісту сірки в паливі під час його виробництва. Однак для цих методів часто потрібні спеціальні електроди та реагенти, що може збільшити вартість аналізу. Також існують обмеження в складі для дуже складних зразків з високим вмістом домішок. Одним з недоліків є необхідність калібрування системи під кожен новий вид палива. Електрохімічні методи можуть бути менш ефективними, ніж інші аналітичні методи, такі як рентгенівський флуоресцентний аналіз або мас-спектрометрія, для точного вимірювання дуже низьких концентрацій сірки. Однак вони підходять для експрес-вимірів, коли важливі швидкість і економія [12].

Сучасні електрохімічні пристрої, такі як Thermo Scientific Orion Ion Selective Electrode, можуть бути інтегровані в автоматизовані системи контролю якості нафтопродуктів. В цілому електрохімічні методи є перспективними для вимірювання сірки, але їх застосування обмежене через складність реалізації в промислових умовах (Рис. 5).



Рис. 5. Thermo Scientific Orion Ion Selective Electrode

Термогравіметричний аналіз (ТА) — це метод аналітичної хімії, який використовується для визначення змін маси зразка під час його нагрівання або охолодження. Основний принцип ТА полягає в тому, що зразок поміщають у спеціальну камеру, де його температура поступово підвищується або знижується, і одночасно вимірюється зміна маси. Це дає змогу визначити, при яких температурах відбуваються ті чи інші процеси, наприклад, випаровування, розкладання чи окислення компонентів зразка.

ТА часто використовується для аналізу вмісту сірки в нафтопродуктах. У випадку нафти і палива термогравіметрія може бути корисною для визначення вмісту сірковмісних сполук або для дослідження термічної стабільності палива. Під час аналізу нафтопродуктів зразок нагрівають до високих температур, при яких сірковмісні сполуки випаровуються або розкладаються, а втрата маси зразка використовується для кількісного визначення цих сполук.



Рис. 6. Термогравіметричний аналізатор Mettler Toledo TGA/DSC 3+

Завдяки здатності ТА виявляти зміни маси при різних температурах цей метод широко використовується в нафтохімічній промисловості. Допомогає визначити стійкість продуктів при нагріванні, випаровуванні легких фракцій і термічному розкладанні органічних і неорганічних сполук [13].

Термогравіметричний аналізатор Mettler Toledo TGA/DSC 3+, який поєднує в собі функції термогравіметрії, дозволяє одночасно вимірювати зміну маси та термічні ефекти в зразках (Рис. 6). Він працює в широкому діапазоні температур від 25°C до 1100°C, забезпечуючи точність вимірювання маси до 0,1 мкг і підтримує швидкість нагріву до 150°C за хвилину. Система може працювати в різних атмосферах, таких як інертні, окислювальні або відновні гази, що дозволяє досліджувати матеріали в різних умовах. Ємність проби до 1 г, що дає можливість аналізувати як малі, так і великі проби. Завдяки одночасному вимірюванню змін маси та термічних ефектів цей прилад ідеально підходить для вивчення термічної стабільності, фазових переходів і кінетики розкладання полімерів, металів, кераміки та інших матеріалів

Титриметричний аналіз — кількісний хімічний аналіз, заснований на точному вимірюванні об'єму розчину реагенту точно відомої концентрації, який витрачається на реакцію з еквівалентною кількістю речовини, що визначається. Титриметричний аналіз використовує реакції нейтралізації, окиснення-відновлення, осадження, комплексоутворення. Наприклад, для визначення сірки в нафтопродуктах пробу спалюють у закритій системі. SO₂, що утворюється, поглинається і окислює H₂O₂ до сульфатної кислоти, яку титрують гідроксидом натрію.

За допомогою титриметрії можна точно виміряти концентрацію речовини, що визначається, оскільки в основі методу лежить точний об'єм стандартного розчину. У порівнянні з іншими методами аналізу, титриметрія не вимагає складного обладнання або складних хімічних реакцій. Метод підходить для різних типів реакцій, таких як нейтралізація, окисно-відновні реакції, осадження та комплексоутворення.

У випадку нафтопродуктів процес спалювання зразка та поглинання діоксиду сірки (SO₂), що утворюється, має виконуватися дуже точно, щоб не втратити частину аналізу. Домішки можуть вплинути на точність результатів, тому необхідно переконатися в чистоті зразка для аналізу. Температура, тиск та інші фактори можуть впливати на перебіг реакцій, що вимагає контролю умов експерименту [13].



Рис. 7. Автономний титратор Metrohm 916 Ti-Touch

Metrohm 916 Ti-Touch — компактний автономний титратор, призначений для ефективного титриметричного аналізу. Система має вбудовану пам'ять на 50 методів, що дозволяє зберігати часто використовувані методи для швидкого доступу (Рис. 7). Він підтримує до 100 тестів на день, що робить його ідеальним для лабораторій із середнім навантаженням. Завдяки 6,5-дюймовому сенсорному дисплею всі функції управління можна виконувати без підключення до комп'ютера.

Ультрафіолетова флуоресценція (УФ) є один із найпоширеніших методів визначення вмісту сірки в нафтовому паливі. Принцип роботи ультрафіолетового випромінювання полягає в тому, що сірка в зразку окислюється до діоксиду сірки (SO_2) під час спалювання. Потім SO_2 збуджується ультрафіолетовим світлом, змушуючи його випромінювати флуоресцентне світло. Інтенсивність цього флуоресцентного випромінювання пропорційна концентрації сірки в зразку.

Цей метод характеризується високою чутливістю і можливістю точного визначення низьких концентрацій сірки в паливі. УФ підходить для аналізу різних типів нафтопродуктів, включаючи дизельне паливо, бензин та інше моторне паливо. Однією з головних переваг методу є його швидкість, що робить його ідеальним для експрес-аналізу.

Прилади, що використовують УФ, зазвичай автоматизовані та мають можливість обробляти велику кількість зразків за короткий час. Ще однією перевагою цього методу є відносна простота експлуатації та можливість використання в польових умовах. УФ дозволяє визначати вміст сірки навіть у дуже малих кількостях, що робить його незамінним для контролю якості палива, особливо в умовах суворих екологічних стандартів [14].

SINDIE 7039 від компанії PAC — це високоточний аналізатор сірки, розроблений для вимірювання низьких концентрацій сірки в таких рідинах, нафтопродукти (Рис. 8). Система забезпечує точність до 0,6 ppm і відповідає стандартам ASTM D7039 щодо контролю вмісту сірки в нафтопродуктах. Завдяки швидкому аналізу проб без необхідності складної підготовки, SINDIE 7039 є ефективним рішенням для використання на нафтопереробних заводах і в лабораторіях контролю якості. Система також мінімізує експлуатаційні витрати, оскільки не потребує витратних матеріалів.



Рис. 8. Високоточний аналізатор сірки SINDIE 7039 від компанії PAC

Газова хроматографія (ГХ) — Метод, призначений для розділення, виявлення та кількісного визначення легких та термостабільних сполук, охоплює близько 5% відомих органічних речовин. Проте саме ці сполуки складають 70–80% матеріалів, що використовуються у виробничих процесах і промисловості. Принцип дії методу заснований на переміщенні рухомої фази, яка виникає за рахунок протікання інертного газу (газ-носія) через нерухому фазу з великою площею поверхні. У ролі рухомої фази можуть використовуватися гази, такі як водень, гелій, азот, аргон або вуглекислий газ, причому водень і азот є доступнішими і дешевшими варіантами.



Рис. 9. Газовий хроматограф Agilent 7890B GC System

Газ-носіє відповідає за транспортування компонентів суміші через хроматографічну колонку, не вступаючи у взаємодію ні з нерухомою фазою, ні з речовинами суміші. Виділяють два основні типи хроматографії: газову адсорбційну та газорідинну. У газовій адсорбційній хроматографії нерухомою фазою виступає твердий матеріал, такий як силікагель, вугілля або оксид алюмінію. У газорідинній хроматографії використовують в'язку нелетку рідину, нанесену на поверхню інертного носія [15].

Однією з найпопулярніших моделей газових хроматографів є Agilent 7890B GC System — це високопродуктивна система, яка використовується для аналізу хімічних речовин та сумішей (Рис. 9). Ця система забезпечує високу точність (до 0,1% достовірної похибки) і надійність результатів завдяки передовим технологіям і широким можливостям налаштування. Agilent 7890B може обробляти до 240 зразків за один сеанс за допомогою автоматизованого інжектора з можливістю одночасного запуску кількох детекторів, таких як напівлетючий іонізаційний детектор, детектор теплопровідності або мас-спектрометр.

Висновки

Визначення вмісту сірки в нафтових паливах є невід'ємною частиною контролю якості нафтопродуктів, забезпечення дотримання екологічних стандартів, оптимізації виробничих процесів у нафтовій промисловості. Розглядаються такі аналітичні методи, як рентгенівська флуоресценція, газова хроматографія, титриметричний аналіз, інфрачервона спектроскопія, ультрафіолетова флуоресценція, мас-спектрометрія з індуктивно пов'язаною плазмою, термогравіметричний аналіз та електрохімічні методи, демонструють широкі можливості для точного та ефективного визначення сірки в нафтопродуктах.

Кожен із методів має свої переваги та обмеження, що дозволяє вибрати оптимальний підхід залежно від аналізу конкретних вимог, умов експлуатації та наявності обладнання. Наприклад, рентгенівська флуоресценція забезпечує швидкий аналіз без використання рук із високим вмістом багатьох елементів, тоді як газова хроматографія та мас-спектрометрія з індуктивно пов'язаною плазмою мають підвищену точність і чутливість, але потребують складної підготовки зразків і великих інвестицій у обладнання.

З розвитком технологій і матеріалознавства аналітичні методи визначення сірки постійно вдосконалюються. Сучасні інновації, такі як використання наноматеріалів, вдосконалені датчики на основі плазмового резонансу та інтеграція автоматизованих систем, сприяють підвищенню точності, швидкості та економічності аналізів. Це дозволяє підприємствам ефективніше контролювати якість палива, зменшувати витрати на аналіз і відповідати суворим екологічним вимогам.

Література

1. Капустян В. О. Проблеми та перспективи розвитку ринку нафтопродуктів в Україні / В. О. Капустян, І. О. Сірецька // Молодий вчений. – 2018. – № 5(57). – С. 709–712.
2. Білецький В.С. Основи нафтогазової справи / В.С. Білецький, В. М. Орловський, В. І. Дмитренко, А. М. Похилко. – Полтава : ПолтНТУ, 2017. – 312 с.
3. Саранчук В.І. Основи хімії і фізики горючих копалин / В.І. Саранчук, М.О.Ільшов, В.В. Ошовський, В.С. Білецький. – Донецьк : Східний видавничий дім, 2008. – 640 с.
4. Ковальський А.В. Про підвищення рівня еколого-енергетичної безпеки України / А.В. Ковальський, Ф.А. Голодніков // Економіка України. – 2000. – № 10. – С. 34–41.
5. Братичак М. М. Хімія нафти та газу: Навчальний посібник / М.М. Братичак, В.М. Гунька – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2017. – 448 с.
6. Білинський Й. Аналіз сучасних методів визначення сірки в вуглеводневих паливах / Й.Й. Білинський, О.М. Сахно // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2017. – № 3 – С. 100–108.
7. Беліков К.М. Рентгенофлуоресцентний аналіз: Навчальний посібник / К.М. Беліков, О.І. Юрченко. – Харків : Харківський національний університет ім. В.Н. КАРАЗІНА, 2012. – 52 с.
8. Баркарь С. В. Методи біотехнологічних досліджень. Частина 2 : курс лекцій для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти ОПП «Біотехнології та біоінженерія» спеціальності 162 «Біотехнології та біоінженерія» денної форми здобуття вищої освіти / С.В. Баркарь. – Миколаїв : МНАУ, 2023. – 50 с.
9. Мельничук Д.О. Аналітичні методи досліджень. Спектроскопічні методи аналізу: теоретичні основи і методики: навчальний посібник для підготовки студентів вищих навчальних закладів / Д.О. Мельничук, С.Д. Мельничук, В.М. Войціцький та ін.: за ред. акад. Д.О. Мельничука. – Київ : ЦП Компринт, 2016. – 289 с.
10. Алемасова А.С. Аналітична хімія. Підручник для вищих навчальних закладів / А.С. Алемасова, В.М. Зайцев, Л.Я. Єнальєва, Н.Д. Щепіна, С.М. Гождзінський. – Донецьк : ДонНУ, 2009. – 415 с.
11. Масленко С.Н. Аналітична хімія і методи аналізу: Навчальний посібник / С.Н. Масленко, В.В. Величко, Н.М. Великонська, В.В. Перескока. – Дніпропетровськ : НМетАУ, 2011. – 162 с.
12. Снігур Д. В. Метрологічні основи хімічного аналізу : курс лекцій / Д.В. Снігур, О.М. Чеботарьов. – Одеса : Одес. нац. ун-т ім. І. І. Мечникова, 2021. – 106 с.
13. Мінаєва В.О. Аналітична хімія. Титриметричний аналіз: Навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів / В.О. Мінаєва, Т.С. Нінова. Ю.А. Шафорост. – Черкаси : Вид. від. ЧНУ імені Богдана Хмельницького, 2010. – 456 с.
14. Зінчук В.К. Фізико-хімічні методи аналізу: Навчальний посібник / В.К. Зінчук, Г.Д. Левицька, Л.О. Дубенська. – Львів : Видавничий центр ЛНУ імені Івана Франка, 2008. – 362 с.
15. Лисенко О.М. Основи газової хроматографії. Навчальний посібник / О.М. Лисенко, Т.В. Ковальчук, В.М. Зайцев. – Київ : ВПЦ Київський університет, 2013. – 121 с.

References

1. Kapustian V. O. Problemy ta perspektyvy rozvytku rynku naftoproduktiv v Ukraini / V. O. Kapustian, I. O. Siretska // Molodyi vchenyi. – 2018. – № 5(57). – S. 709–712.

2. Biletskyi V.S. Osnovy naftohazovoi spravy / V.S. Biletskyi, V. M. Orlovskiy, V. I. Dmytrenko, A. M. Pokhylko. – Poltava : PoltNTU, 2017. – 312 s.
3. Saranchuk V.I. Osnovy khimii i fizyky horiuchykh kopalyn / V.I. Saranchuk, M.O. Ilyashov, V.V. Oshovskiy, V.S. Biletskyi. – Donetsk : Skhidnyi vydavnychiy dim, 2008. – 640 s.
4. Kovalskyi A.V. Pro pidvyshchennia rivnia ekoloho-enerhetychnoi bezpeky Ukrainy / A.V. Kovalskyi, F.A. Holodnikov // Ekonomika Ukrainy. – 2000. – № 10. – S. 34–41.
5. Bratychak M. M. Khimiiia nafty ta hazu: Navchalnyi posibnyk / M.M. Bratychak, V.M. Hunka – Lviv : Vydavnytstvo Lvivskoi politekhniki, 2017. – 448 s.
6. Bilynskiy Y.Y. Analiz suchasnykh metodiv vyznachennia sirky v vuhlevodnykh palyvakh / Y.Y. Bilynskiy, O.M. Sakhno // Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu. – 2017. – № 3 – S. 100–108.
7. Bielikov K.M. Renthenofluorestantsnyi analiz: Navchalnyi posibnyk / K.M. Bielikov, O.I. Yurchenko. – Kharkiv : Kharkivskiy natsionalnyi universytet im. V.N. Karazina, 2012. – 52 s.
8. Barkar Ye. V. Metody biotekhnolohichnykh doslidzhen. Chastyna 2 : kurs leksii dlia zdobuvachiv pershoho (bakalavrskoi) rivnia vyshchoi osvity OPP «Biotekhnolohii ta bioinzhenieriia» spetsialnosti 162 «Biotekhnolohii ta bioinzhenieriia» dennoi formy zdobuttia vyshchoi osvity / Ye.V. Barkar. – Mykolaiv : MNAU, 2023. – 50 s.
9. Melnychuk D.O. Analitichni metody doslidzhen. Spektroskopichni metody analizu: teoretychni osnovy i metodyky: navchalnyi posibnyk dlia pidhotovky studentiv vyshchykh navchalnykh zakladiv / D.O. Melnychuk, S.D. Melnychuk, V.M. Voitsitskiy ta in.: za red. akad. D.O. Melnychuka. – Kyiv : TsP Komprint, 2016. – 289 s.
10. Alemasova A.S. Analitichna khimiiia. Pidruchnyk dlia vyshchykh navchalnykh zakladiv / A.S. Alemasova, V.M. Zaitsev, L.Ya. Yenaliyeva, N.D. Shchepina, S.M. Hozhdzinskiy. – Donetsk : DonNU, 2009. – 415 s.
11. Maslenko S.N. Analitichna khimiiia i metody analizu: Navchalnyi posibnyk / S.N. Maslenko, V.V. Velychko, N.M. Velykonska, V.V. Pereskoka. – Dnipropetrovsk : NMetAU, 2011. – 162 s.
12. Snihur D. V. Metrologichni osnovy khimichnoho analizu : kurs leksii / D.V. Snihur, O.M. Chebotarov. – Odesa : Odes. nats. un-t im. I. I. Mechnykova, 2021. – 106 s.
13. Minaieva V.O. Analitichna khimiiia. Tytrymetrychni analiz: Navchalnyi posibnyk dlia studentiv vyshchykh navchalnykh zakladiv / V.O. Minaieva, T.S. Ninova, Yu.A. Shafarost. – Cherkasy : Vyd. vid. ChNU imeni Bohdana Khmelnytskoho, 2010. – 456 s.
14. Zinchuk V.K. Fizyko-khimichni metody analizu: Navchalnyi posibnyk / V.K. Zinchuk, H.D. Levytska, L.O. Dubenska. – Lviv : Vydavnychiy tsentr LNU imeni Ivana Franka, 2008. – 362 s.
15. Lysenko O.M. Osnovy hazovoi khromatohrafii. Navchalnyi posibnyk / O.M. Lysenko, T.V. Kovalchuk, V.M. Zaitsev. – Kyiv : VPTS Kyivskiy universytet, 2013. – 121 s.