

П. М. Турчик; І. В. Васильківський, к. т. н.

ЗАСОБИ АВТОМАТИЗОВАНОГО КОНТРОЛЮ ЕКОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ НАФТОПРОДУКТІВ

Розглянуто проблемні питання визначення основних параметрів нафтопродуктів, які прямо чи опосередковано впливають на стан навколишнього природного середовища під час згорання пального у двигунах внутрішнього згорання. Проаналізовано принцип роботи та наведено структурні схеми засобів автоматизованого контролю для визначення загального вмісту сполук сірки та механічних домішок нафтопродуктів, а також описано можливості спектральних аналізаторів у визначенні октанового числа нафтопродуктів за спектрами їх поглинання, розсіювання та пропускання в інфрачервоній області.

Вступ

Визначення хімічного складу нафти і її фракцій трудомістке і до кінця нездійсненне на сьогодні завдання. Навіть фракційний склад бензинів відомий лише на 80 %. Тому на даний час використовують методи аналізу, що дозволяють визначити груповий хімічний чи структурно-груповий склад нафти і її фракцій. Найменш вивчені компоненти висококиплячих фракцій нафти. При складанні матеріального балансу групового складу враховуються тільки три класи вуглеводнів: насичені аліфатичні (алкани), нафтеніві (циклани) і ароматичні (арени). Крім того, іноді наводять деталізований груповий склад, який відображає також вміст різних індивідуальних вуглеводнів, що входять до складу кожної з груп. Гібридні вуглеводні сконцентровані переважно у висококиплячих фракціях нафти, що ускладнює визначення їх групового хімічного складу [1].

На сьогоднішній день бензин є одним з основних видів пального для двигунів внутрішнього згорання, але останнім часом склалась вкрай складна ситуація на ринку нафтопродуктів. Це й високі темпи зростання цін, поступове зниження якості, значний сезонний дефіцит, особливо світлих нафтопродуктів тощо, у зв'язку із чим зростають вимоги до контролю показників якості та основних екологічних параметрів нафтопродуктів, зокрема вмісту механічних домішок і води, фракційного складу, масового вмісту сірки та ін. Даним питанням присвячені роботи Гуреева А. А., Маркова В. А., Робака М. С., Большакова Г. Ф. та інших.

Щодо якості нафтопродуктів, то махінації із бензином проводяться в більшості випадків на самих нафтопереробних заводах (НПЗ). Наприклад, до бензину низького сорту додають значну кількість ароматичних вуглеводнів, які підвищують октанове число палива і, відповідно, його ціну, однак завдають шкоди як двигуну автомобіля, так і довкіллю. Такі добавки є результатом хімічного виробництва, вони дешеві і тому їх використання дає НПЗ додаткові прибутки. За повідомленнями Держкомстату, на більшості вітчизняних АЗС бензин не відповідає чинним стандартам (ДСТУ 4063-2001, ДСТУ 3868-99 та ін.), тому що, насправді, ця рідина неприємного жовтого кольору є не що інше, як суміш вуглеводневої основи (з низьким октановим числом), води, антифризу, технічного спирту та інших дешевих добавок, що підвищують антидетонаційну стійкість пального. Якщо на такому бензині тривалий час експлуатувати автомобіль, то часто доводиться ремонтувати двигун. Причина фальсифікації і підробки проста: бензин не можна спробувати на смак, а його колір не визначає його якість.

Постановка проблеми

Бензин (автомобільний бензин) – рідке паливо – суміш вуглеводнів різної будови, яку отримують шляхом перегонки і каталітичної переробки нафти, переробки кам'яного вугілля і горючих сланців, а також природного газу. Автомобільні бензини можуть також містити синтетичні і неуглеводневі компоненти.

Відомо, що всі типи нафтопродуктів до свого безпосереднього використання у двигунах автомобілів проходять такі стадії:

- розробки і виготовлення дослідного зразка;
- виробництва товарного продукту;
- застосування в техніці (транспортування, збереження і використання споживачем).

Для забезпечення гарантій якості товарного нафтопродукту необхідний його постійний контроль, що має свої особливості на кожному із зазначених етапів. Так, на етапі розроблення нового чи модернізованого виду пального використовують лабораторні методи й установки, що моделюють реальні умови експлуатації техніки; на етапі виробництва – стандартні хімічні і фізико-хімічні методи аналізу складу; на етапі застосування необхідні надійні експрес-методи інструментального аналізу якості і складу нафтопродукту [2].

Найефективнішим і перспективним способом контролю якості нафтопродуктів у місцях зберігання і продажу є застосування спеціалізованих пересувних лабораторій, оснащених необхідними засобами вимірювання.

У зв'язку із цим виникає необхідність у розробленні засобів автоматизованого контролю основних параметрів нафтопродуктів.

Розроблення засобів автоматизованого контролю основних параметрів нафтопродуктів

До основних параметрів нафтопродуктів (бензин, дизельне пальне та оливи), які контролюються на даний час, належать: октанове число, густина при 20 °С, вміст механічних домішок і води, фракційний склад, масова частка сірки та азоту, вміст фактичних смол, температура застигання, кінематична в'язкість тощо [1–2].

В даний час для контролю основних параметрів нафтопродуктів широкого поширення отримали оптичні методи. Показник заломлення нафтопродуктів визначають при проходженні світлового променя з повітря в нафтопродукт, і тому він завжди більше одиниці. Для вуглеводнів різних класів, при однаковій кількості атомів вуглецю в молекулах, найменшу рефракцію мають алкани, потім ідуть олефіни, нафтени й ариени. Показник заломлення суміші вуглеводнів є адитивною функцією її складу і тому використовується при визначенні структурно-групового вуглеводного складу палив.

Майже усі нафти мають здатність обертати площину поляризації променів світла, причому для більшості з них характерне слабке праве обертання. Оптична активність зростає з підвищенням температури кипіння фракції. Штучні нафти, на відміну від природних, оптичної активності не виявляють. Оптичну активність природних нафт пояснюють наявністю в них продуктів розкладання холестерину і фітостерину, тобто характерних стеринів, що містяться в рослинах і тваринах. Це приводиться в якості одного з доказів органічного походження нафти.

Одним з методів швидкого (експресного) одержання результату, що характеризує властивості бензину, є використання аналізатора якості на потоці (аналізатора в ближній інфрачервоній (ІЧ) області, імітатора дослідного двигуна і т.п.). Основними перевагами аналізаторів у ІЧ-області є швидкість одержання результату, а також можливість одержання з однієї проби поряд з основними показниками, що характеризують якість бензину (наприклад, октанове число), цілого ряду інших показників якості (вміст механічних домішок та води, масова частка сірки та ін.).

Застосування автоматичних аналізаторів якості нафтопродуктів дозволяє реалізувати оперативний контроль і керування технологічним процесом змішування.

Техніко-економічний ефект від впровадження автоматичних аналізаторів якості зумовлений такими факторами:

- поліпшенням якості товарної продукції і запобіганням випуску некондиційного продукту;
- скороченням витрат на лабораторний аналітичний контроль;
- одержанням інформації, що характеризує якість у реальному масштабі часу і можливості використання цієї інформації в автоматизованих системах керування.

Використання стандартних лабораторних методів дозволяє одержати результат не ра-

ніше, ніж через 1–2 години. У реальних умовах роботи заводських лабораторій, як правило, цей процес триває 2–3 години.

Поряд зі стандартними методами визначення основних параметрів нафтопродуктів у даний час набувають широкого поширення експрес-методи, основані на застосуванні спектральних методів аналізу, у тому числі, і спектральний аналіз в інфрачервоній області [2].

У ІЧ-області спектра знаходяться всі основні гармоніки коливальних спектрів основних вуглеводнів, що входять до складу бензинів. Таким чином, ІЧ-спектр бензину є його унікальною характеристикою, за якою можна проводити визначення таких показників якості, як фракційний склад, октанове число та ін.

Враховуючи останні негативні тенденції на ринку нафтопродуктів у сторону погіршення їх якості, слід констатувати, що на даний час зростає потреба в оперативному контролі усіх видів палива, що використовуються у двигунах внутрішнього згорання (ДВЗ), в тому числі і палив з біодобавками. Головну увагу слід сконцентрувати на токсичних елементах, зокрема сірки, що чинять негативний вплив на навколишнє природне середовище, згораючи у двигунах. Сірка в нафті присутня у різній формі – від елементної сірки і сірководню до сірчистої органіки, що включає понад 120 сполук.

Вміст загальної сірки в нафтах, зазвичай, менше 1 %, однак він може коливатися в межах 0,05–6 %. Сірчисті сполуки в нафтах і нафтопродуктах є шкідливими компонентами, що кородують метали. Крім того, вони додають нафтопродуктам неприємний запах і токсичні властивості, а також погіршують антидетонаційні властивості бензинів.

Взагалі, методи визначення сірчистих сполук у нафтопродуктах за характером застосування можна розділити на дві групи. Способи першої групи служать для визначення вмісту сірчистих сполук у світлих нафтопродуктах: бензинах, лігроїнах, реактивних і дизельних паливах та керосинах. Способи іншої групи використовують для визначення вмісту сірчистих сполук у мастилах, нафті, котельних паливах, гудронах і інших подібних продуктах.

Для визначення вмісту сірководню і меркаптанів у дизельних і реактивних паливах та бензинах існує стандартний метод за ГОСТ 17323-71. Це метод визначення вмісту меркаптанової і сульфідної сірки потенціометричним титруванням розчином нітрату діаміносрібла (I). Вміст меркаптанової сірки розраховують за об'ємом розчину нітрату діаміносрібла (I), витраченого на титрування палива, що не містить сірководень.

Вміст сульфідної сірки розраховують як різницю об'ємів розчинів нітрату діаміносрібла (I), витрачених на титрування, до і після видалення сірководню з палива.

Але, як вже зазначалось раніше, лабораторні методи не є експресними, час аналізу коливається в межах від 1 до 2–3 годин. Ще одним обмеженням лабораторних методів є те, що всі дослідження потрібно проводити у стаціонарних умовах дослідної лабораторії. Тому набуває актуальності розроблення пристрою для автоматизованого оперативного контролю наявності у паливах домішок, зокрема сірки, що можуть утворювати токсичні сполуки, згораючи в

автомобільних двигунах, котлах котельні чи інших енергетичних установках [1, 4].

Розроблену структурну схему приладу для визначення концентрації сірки в нафтопродуктах показано на рис. 1.

У приладі використаний метод, що полягає в спалюванні проби палива в потоці повітря і визначенні концентрації сірчистого ангідриду SO_2 в продуктах згорання з використанням кулонометричного перетворю-

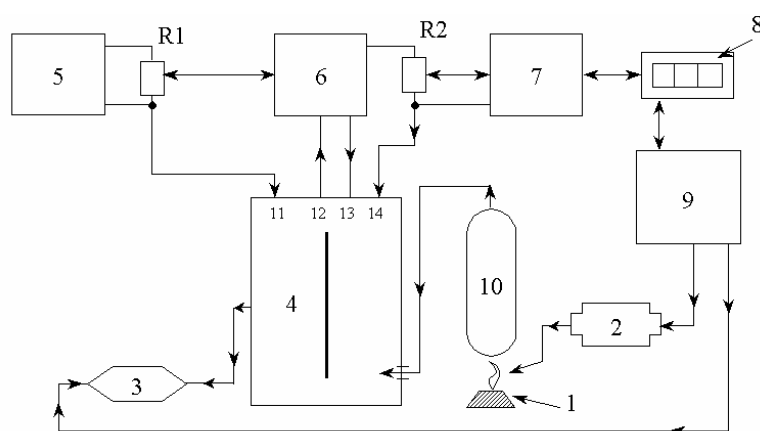


Рис. 1. Структурна схема для визначення вмісту сірки в нафтопродуктах

перетворювача.

Нафтопродукт, що контролюється, спалюється в пальнику 1, у який він подається від насоса-дозатора 2, що також регулює швидкість потоку повітря. Продукти згоряння за допомогою повітряного насоса (аспіратора) 3 проходять через лампове скло 10 і поглинальний розчин у кулонометричному перетворювачі 4.

У кулонометричному перетворювачі підтримується на заданому рівні окислювально-відновний потенціал (ОВП) електрохімічної пари йод/йодид-іон. ОВП визначається різницею потенціалів між індикаторним електродом 11, що складається з суміші діоксиду марганцю з вуглецем, які перебувають в контакті з платиновою сіткою і хлор-срібним електродом порівняння 12. В результаті хімічної реакції I_2 і SO_2 утворюються йодид іони, які окислюються на платиновому робочому електроді. Величина струму окислення в кожний момент часу відповідає концентрації SO_2 . ОВП задається співвідношенням швидкості відновлення йоду в йодид-іон під дією сірчистого ангідриду, що поглинається з продуктів згоряння, і швидкості генерації йоду за рахунок електрохімічного окислювання йодид-іона за допомогою робочих електродів 13 і 14. У якості робочих електродів використані платинові електроди, які живляться струмом від електронної схеми, яка автоматично підтримує заданий ОВП, змінюючи в необхідних межах струм, що проходить через робочі електроди [5, 6].

Умовою підтримки постійного ОВП є рівність швидкості надходження сірчистого ангідриду з продуктами згоряння і швидкості генерації йоду, однозначно зумовленої струмом електролізу.

Концентрація сірки у досліджуваному паливі визначається кількістю електрики, що пройшла через робочі електроди за визначений час вимірювання, а також обсягом палива, що спалюється за цей проміжок часу (поданим насосом-дозатором у пальник).

За умови, що швидкість дифузії частинок деполаризатора до поверхні електрода лімітується значенням струму електролізу, то, використовуючи закон Фіка, можна записати [7]

$$\frac{dN_x}{d\tau} = Ds \left(\frac{dc}{dx} \right), \quad (1)$$

де $\frac{dN_x}{d\tau}$ — число молів деполаризатора, що реагують на електроді за одиницю часу;

$\frac{dc}{dx}$ — градієнт концентрації деполаризатора біля поверхні робочого електрода; D — коефіцієнт дифузії деполаризатора; s — площа поверхні робочого електрода.

Вихідне значення струму під час електролізу розчину знаходять за формулою:

$$I_\tau = I_0 e^{-\frac{Ds\tau}{V\delta}}, \quad (2)$$

де V — об'єм розчину деполаризатора; δ — товщина дифузійного шару; τ — інтервал часу реакції.

З рівнянь (1) і (2) випливає

$$\frac{dc}{d\tau} = -\frac{Dsc}{V\delta}. \quad (3)$$

Інтегруючи рівняння (3) від 0 до τ , матимемо:

$$\ln(c_\tau / c_{\tau=0}) = -\frac{Ds\tau}{V\delta}. \quad (4)$$

Здійснивши деякі перетворення, отримаємо:

$$c_\tau = c e^{-Ds\tau/V\delta}. \quad (5)$$

Встановлення заданого значення ОВП здійснюється джерелом опорної напруги 5 змінним резистором R1. Різниця напруг, одна з яких знімається з резистора R1, а друга — формується ланцюгом вимірювальних електродів 11 і 12, подається на вхід диференці-

ального підсилювача 6, вихідний струм якого генерує окислювач у розчині за допомогою робочих електродів 13 і 14.

У вихідний ланцюг диференціального підсилювача включені послідовно робочі електроди і резистор R2, спадання напруги з резистора R2 перетворюється аналого-цифровим перетворювачем (АЦП) 7 у цифровий код. АЦП видає цифровий код, пропорційний середньому значенню за час вимірювання τ концентрації сірки в грамах сірки на 1 л обсягу досліджуваного типу палива.

Результат вимірювання виводиться на цифровий індикатор 8. Блок управління 9 містить персональний комп'ютер з відповідним програмним забезпеченням, що дозволяє

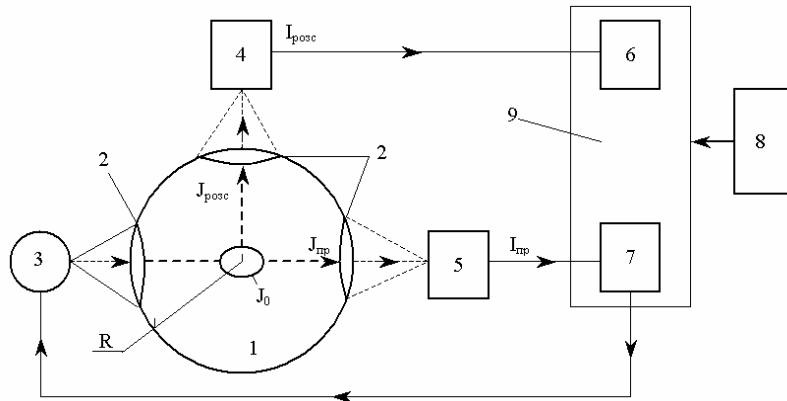


Рис.2. Структурна схема пристрою для визначення мінеральних домішок у нафтопродуктах

здійснювати регулювання швидкості подачі палива в пальник від насоса-дозатора в режимі вимірювання і наборі палива при підготовці приладу до роботи.

На рис. 2 показана структурна схема пристрою для визначення мінеральних домішок у нафтопродуктах.

В процесі промислової переробки нафти не можливо видалити всі мінеральні речовини, що входять до її складу, зокрема механічних домішок та кислотних

компонентів. Тому виникає необхідність контролю їх концентрації на різних стадіях технологічного процесу переробки і у готових нафтопродуктах, що є важливим з точки зору зменшення токсичності газових викидів автотранспорту та екологічного моніторингу концентрації забруднюючих компонентів у них.

Розроблена система призначена для поточного (стаціонарного) чи періодичного вимірювального контролю поглинальних характеристик (наявності домішок) нафтопродуктів в інфрачервоній області спектра.

Прилад містить оптичний давач, що включає первинний вимірювальний перетворювач, який містить вимірювальну кювету 1 і оптичні лінзи 2, систему монохроматичного випромінювання на основі напівпровідникового лазера 3 і два фотоприймачі з ланцюгами навантаження та підсилення на основі германієвого фоторезистора з інфрачервоним світлофільтром – розсіяного 4 і прохідного 5 випромінювання, 9 – персональний комп'ютер, у складі якого: 6 – частотний адаптер, 7 – контролер з шинами та інтерфейсною мережею, 8 – пакет управляючих програм у вигляді експертної системи.

Контроль здійснюється таким чином. Монохроматичне випромінювання від лазера 3 надходить у вимірювальну систему (первинний вимірювальний перетворювач). Завдяки германієвому фоторезистору у фотоприймачах виникає фотострум, що підсилюється і перетворюється у напругу, а потім у інформативний частотний сигнал. У адаптері 6 здійснюється перетворення інформативного параметра частоти в цифровий бінарний код і передається через шинні формувачі у системний канал основного процесора комп'ютера, який його запам'ятовує чи відтворює у зручній для користувача формі [3, 6, 7].

Інфрачервоне випромінювання, проходячи через кювету з досліджуваним нафтопродуктом, утворює два світлових потоки, інтенсивність світла в яких визначається за такими виразами [6]:

$$\left. \begin{aligned} J_{розс} &= J_0 \Omega e^{-\gamma R}; \\ J_{пр} &= J_0 (1 - K) e^{-\gamma R}, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

де $J_{розс}$ – інтенсивність розсіяного на механічних домішках світла на фотоприймачі 4; $J_{пр}$ – інтенсивність прохідного світла на фотоприймачі 5; J_0 – інтенсивність світла в цен-

трі кювети; K – коефіцієнт розсіювання світла на механічних домішках; Ω – об'ємний кут огляду фотоприймача 4 ($\Omega = \pi D^2/4R^2$); γ – показник поглинання світла в рідині.

Фотострум, який виникає у фотоприймачах розсіяного і прохідного світла, має значення

$$\left. \begin{aligned} I_{розс} &= J_{розс} S_1 = J_{розс} S_{01} (1 + \alpha_1 \Delta T); \\ I_{пр} &= J_{пр} S_2 = J_{пр} S_{02} (1 + \alpha_2 \Delta T), \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

де S_{01} і S_{02} – спектральні чутливості фотоприймачів 4 і 5; α_1 і α_2 – температурні коефіцієнти зміни чутливості фотоприймачів; ΔT – температурний градієнт.

Масштабний підсилювач 6 здійснює перетворення вихідної напруги розсіяного каналу

$$U_{підс} = N I_{розс} R_n, \quad (8)$$

де R_n – опір навантаження фотоприймача.

Отже,

$$N = \frac{S_{02} (1 + \alpha_2 \Delta T) 4R^2}{S_{01} (1 + \alpha_1 \Delta T) \pi D^2}. \quad (9)$$

Результат вимірювання представлений цифровим бінарним кодом

$$Z = \frac{N U_{розс}}{U_{пр} + N U_{розс}} = K. \quad (10)$$

Таким чином, цифровий код пропорційний коефіцієнту розсіювання світла на механічних домішках і не залежить від зміни фізичних параметрів елементів вимірювальної схеми, що дозволяє контролювати відсотковий вміст механічних домішок у нафтопродуктах у два етапи: на першому – вимірювальну кювету заповнюють очищеним від механічних домішок зразком будь-якого типу і встановлюють показання реєстратора на нуль, після чого зразок зливають з кювети; на другому – у кювету заливають досліджуваній нафтопродукт і за показниками індикатора знімають результати вимірювань. Градування приладу здійснюється при його налаштуванні і при перевірці за допомогою стандартних зразків [6, 7].

Спектральні аналізатори дозволяють вимірювати усі фізико-хімічні параметри нафтопродуктів, що визначаються їх вуглеводневим складом (і, відповідно, які корелюють зі «спектральними портретами»). Виняток складають ті характеристики нафтопродуктів, що залежать від тих особливостей хімічного складу, які не відбиваються в спектрах поглинання ближнього інфрачервоного діапазону. Наприклад, до таких параметрів відноситься концентрація металів у паливі.

Щодо визначення октанового числа бензинів, то його визначають аналогічно контролю окремих хімічних компонентів. На октанове число впливають найрізноманітніші компоненти пального, зокрема процеси детонації залежать від ступеня ненасиченості, ароматичності і розгалуженості вуглеводнів. Ці ж хімічні особливості бензину визначають і його «спектральний портрет». Фактично, спектральний прилад розраховує октанове число бензину за його хімічним складом, не вимірюючи в явному вигляді концентрації всіх основних компонентів пального. Причому, в такому розрахунку враховується так само і взаємний вплив на детонацію різних типів вуглеводнів для конкретних сортів палива [5].

Октанове число бензину визначається багатьма хімічними компонентами бензину. Саме тому, визначення октанового числа є складнішою аналітичною задачею, ніж контроль концентрації однієї конкретної речовини. Октанове число бензину може бути визначене або прямим вимірюванням детонації в спеціальних моторах, або ж розраховане за його хімічним складом в явному (як у хроматографах) чи неявному вигляді (як у спектрофотометрах із застосуванням регресійного аналізу). Спрогнозувати октанове число бензину за зміною будь-якої іншої фізико-хімічної характеристики пального поки-що не вдалося. Наприклад, за фракційним складом, щільністю чи в'язкістю нафтопродукту можна оцінити до якого типу пального відноситься досліджуваній продукт, однак неможливо визначити значення його октанового числа, тим більше для сучасних високооктанових бен-

зинів з органічними присадками.

Незважаючи на те, що застосування спектральних аналізаторів чи хроматографів для визначення детонаційної стійкості обходиться в багато разів дешевше, ніж використання одноциліндрових установок, пошуки інших, ще простіших і дешевших методів, придатних для визначення октанового числа, велися до середини 90-х років. У якості альтернативних методів розглядалися діелектричні вимірювання, оптична рефрактометрія і ряд інших підходів. Прилади, створені на цих принципах, прості за своєю побудовою і тому набагато дешевші, ніж спектральні аналізатори. Однак ці альтернативні методи не забезпечують вірогідність і точність вимірювань. Параметри пального, що вимірюються в таких методах (діелектрична проникність, коефіцієнт заломлення і т. п. чи їх комбінація) мають гіршу кореляцію із сортом бензину, ніж, навіть, щільність нафтопродукту. Очевидно, що такі альтернативні методи не дозволяють контролювати хімічний склад пального, наприклад, вміст бензолу чи будь-якого іншого компонента. У той же час, визначення октанового числа є складнішою задачею, у якій важливе визначення всіх основних компонентів пального, включаючи усі використані присадки. Зрозуміло, що неможливо навіть з мінімальною вірогідністю контролювати такий складний параметр пального, як октанове число, якщо метод не забезпечує вимірювання концентрації хоча б однієї будь-якої речовини в пальному [1, 5].

Пристрої на основі альтернативних підходів дешеві, оскільки є простішими у виготовленні, але в реальних умовах не забезпечують точність вимірювань, тому єдиним достовірним методом експрес-контролю бензину є метод оптичної спектроскопії, який вже одержав визнання в усьому світі.

Висновки

Розроблені засоби для автоматизованого контролю сполук сірки та мінеральних домішок дозволяють здійснювати оперативний автоматизований контроль, що важливо, насамперед, для екологічного моніторингу продуктів метаболізму токсичних сполук сірки та інших елементів під час згорання у двигунах внутрішнього згорання автомобілів та інших енергетичних установках (котельнях, ТЕС).

Інфрачервоні спектри поглинання, відбивання чи розсіювання є надзвичайно інформативними щодо складу і властивостей проби. Зіставляючи ІЧ-спектр зразка зі спектрами відомих речовин, можна ідентифікувати невідому речовину, ідентифікувати домішки, провести фракційний чи структурно-груповий аналіз. Методом кореляційного аналізу по ІЧ-спектру проби також можна визначити більшість його фізико-хімічних характеристик тощо. У сучасних приладах ІЧ-спектр визначається скануванням за зміщенням фаз між двома частинами розділеного світлового пучка (Фур'є-спектрометрія). Цей метод надає значну перевагу у фотометричній точності і точності відліку довжини хвилі.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Гуреев А. А. Азев В. С. Автомобильные бензины. Свойства и применение: Учебное пособие для вузов. — М.: Нефть и газ, 1996. — 444 с.
2. Казицына Л. А., Куплетская Н. Б. Применение УФ-, ИК- и ЯМР-спектроскопии в органической химии: Учебное пособие для вузов. — М.: Высшая школа, 1971. — 264 с.
3. Петрук В. Г. Спектрофотометрія світлорозсіювальних середовищ (теорія і практика оптичного вимірювального контролю). — Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2000. — 207 с.
4. Сирцева И. Н., Улендеева А. Д., Парфенова М. А. и др. Сероорганические соединения нефтей различного типа // Нефтепереработка и нефтехимия. — 2002. — № 9. — С. 33—39.
5. Пономарьова Е. Р. Определение показателей качества автомобильных бензинов // Партнеры и конкуренты. — 2001. — № 7. — С. 33—34.
6. Васильева Т. В., Галкин П. С., Михайленко А. А., и др. Прибор для определения концентрации серы в нефтепродуктах // Тр. МНТК «Актуальные проблемы электронного приборостроения», 2000. — С. 123—128
7. Агасян П. К., Хамракулов Т. К. Кулонометрический метод анализа. — М.: Химия, 1984. — 168 с.

Турчик Павло Миколайович — асистент; **Васильківський Ігор Володимирович** — старший викладач.

Кафедра хімії та екологічної безпеки, Вінницький національний технічний університет