

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2025-83-27>

УДК 621.892:535.37

ДОРОЖИНСЬКА Ганна

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

<https://orcid.org/0000-0002-9352-3761>

email: annakushnir30@ukr.net

ЛИТВИН Віталій

Інститут фізики напівпровідників імені В.С. Лашкарьова НАН України

<https://orcid.org/0000-0003-1241-4457>

email: lytv@ukr.net

ДОРОЖИНСЬКИЙ Гліб

Інститут фізики напівпровідників імені В.С. Лашкарьова НАН України

<https://orcid.org/0000-0002-7881-2493>

email: gvdorozinsky@ukr.net

ДОСЛІДЖЕННЯ ДЕГРАДАЦІЇ МОТОРНИХ ОЛИВ ФЛЮОРЕСЦЕНТНИМ МЕТОДОМ

В статті викладені дослідження, які спрямовані на розробку флуоресцентної спектроскопії як експрес-методу діагностики стану оливи, що може стати альтернативою стандартним лабораторним аналізам.

У роботі досліджено деградацію синтетичної моторної оливи, використовуючи флуоресцентний аналіз та визначення кислотного числа. Вимірювання спектрів флуоресценції здійснювали на флюориметрі FluoroTest, а кислотне число визначали потенціометричним титруванням гідроксидом калію. Для аналізу використовували зразки свіжої оливи та відпрацьованої після пробігу автомобіля на відстанях 180, 430, 720 та 910 км.

Показано, що з ростом пробігу автомобіля інтенсивність флуоресценції зменшується, а співвідношення піків при 584 нм і 610 нм змінюється, що свідчить про структурні зміни у складі оливи. Результати показали, що зі збільшенням пробігу кислотне число оливи зростає, що вказує на її окислення. Запропоновано коефіцієнт деградації моторної оливи (Кдмо), який визначається як відношення інтенсивностей зазначених піків та який пропорційно зростає з кислотним числом на ранніх етапах експлуатації. Встановлено лінійну кореляцію між кислотним числом і Кдмо для пробігу до 500 км ($R^2 = 0,9913$).

Отримані результати підтверджують доцільність використання спектроскопічних методів у поєднанні з титриметричним аналізом для оперативної оцінки стану моторних оливи та контролю їх експлуатаційних характеристик.

Ключові слова: моторна олива, флуоресцентна спектроскопія, потенціометричне титрування, кислотне число.

DOROZINSKA Hanna

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

LYTVYN Vitalii, DOROZINSKY Glib

V.Ye. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics (ISP), NAS of Ukraine

INVESTIGATION OF MOTOR OIL DEGRADATION BY FLUORESCENCE METHOD

This article presents a study aimed at developing fluorescence spectroscopy as an express method for diagnosing the condition of motor oil, which can serve as an alternative to standard laboratory analyses.

The work investigated the degradation of synthetic motor oil using fluorescence analysis and acid number determination. Fluorescence spectra were measured with a FluoroTest fluorimeter, and the acid number was determined by potentiometric titration with potassium hydroxide. The analysis used samples of fresh oil and used oil after the car had traveled distances of 180, 430, 720, and 910 km.

It is shown that with increasing mileage, the fluorescence intensity decreases, and the ratio of peaks at 584 nm and 610 nm changes, indicating structural changes in the oil's composition. The results revealed that the acid number of the oil increases with mileage, which points to its oxidation. A motor oil degradation coefficient (Kdmo) is proposed, defined as the ratio of the intensities of the mentioned peaks, and which increases proportionally with the acid number at the early stages of use. A linear correlation between the acid number and Kdmo was established for mileage up to 500 km ($R^2=0.9913$).

The obtained results confirm the feasibility of using spectroscopic methods in conjunction with titrimetric analysis for the rapid assessment of motor oil condition and the control of its operational characteristics.

Keywords: motor oil, fluorescence spectroscopy, potentiometric titration, acid number.

Стаття надійшла до редакції / Received 30.07.2025

Прийнята до друку / Accepted 24.08.2025

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

Зі зростанням вимог до промисловості зростає і потреба у високоякісних моторних оливах. Це пов'язано із забрудненням довкілля, вичерпанням нафтових ресурсів та змінами в конструкції двигунів. В умовах високих температур та тиску в двигуні олива окислюється, що призводить до утворення вільних кислот, смол та інших шкідливих речовин, які погіршують роботу двигуна і скорочують термін його служби.

Моторні оливи - це мастильні матеріали, призначені для змащування та захисту двигунів

внутрішнього згоряння, які поділяються на мінеральні, синтетичні та напівсинтетичні. Вони працюють в екстремально складних умовах, піддаючись різким перепадам температур, тиску та хімічним впливам. Окрім змащування, оливи повинні виконувати багато функцій, таких як охолодження, очищення, ущільнення та захист деталей від корозії.

Якість моторних олив визначається комплексом ключових властивостей. До них належать в'язкісно-температурні властивості, які забезпечують стабільну плинність при різних температурах, а також антиокисні та антикорозійні властивості, що захищають від утворення відкладень та іржі. Крім того, важливими є мийно-диспергуючі властивості, які утримують забруднення в суспензії, та протизносні й протизадирні властивості, що запобігають механічному пошкодженню деталей [1]. Завдяки додаванню спеціальних присадок, оливи також набувають антифрикційних і протипінних якостей, що в сукупності забезпечує оптимальну роботу двигуна в складних умовах.

Якість моторної оливи визначається комплексом фізико-хімічних параметрів [2]. В'язкість є показником якості оливи, що визначає її здатність створювати захисну плівку між рухомими частинами двигуна. Висока в'язкість потрібна для захисту від зносу, а низька - для легкого запуску двигуна при низьких температурах. Температура спалаху - це найнижча температура, при якій пара оливи утворює з повітрям горючу суміш, здатну короткочасно спалахнути від відкритого полум'я. Цей показник характеризує пожежну небезпеку оливи та наявність у ній легкозаймистих домішок. Вміст води та механічних домішок є показниками, що важливі для оцінки чистоти оливи. Вода може спричинити корозію, а механічні домішки (частинки металу, сажа) збільшують знос двигуна. Загальне лужне число - це показник запасу лужних присадок в оливі, що нейтралізують кислотні продукти згоряння палива, які можуть спричинити корозію. Зі зростанням часу експлуатації оливи цей показник зменшується.

Ключовою властивістю моторних олив є стійкість до окислення. Через сучасні тенденції у експлуатації двигунів та зменшенні витрат оливи, умови її роботи стають більш жорсткими, що прискорює процес окислення. Згодом олива втрачає свої основні властивості, такі як мийні, нейтралізуючі, антиокислювальні та антикорозійні. Загальне кислотне число показує кількість кислотних сполук в оливі, які утворюються в процесі її окислення та деградації. Зростання цього показника свідчить про старіння оливи і втрату її захисних властивостей. Кислотне число - це важливий показник якості оливи, що визначає кількість вільних кислот у ній. Вимірюється воно в міліграмах їдкого натрію, необхідного для їх нейтралізації. [3, 4].

Існують різні методи контролю якості моторної оливи [5]. Фотометричний метод аналізу є ефективним способом оцінки якості моторних олив, оскільки він базується на вимірюванні поглинання світла оливою. Цей метод дозволяє не лише оцінити ступінь старіння та окислення, а й відстежити утворення нерозчинних продуктів, що впливають на протизносні властивості оливи. Хоча метод добре відображає зміни в молекулярній структурі, його чутливість до великих частинок забруднень є обмеженою.

Метод молекулярної інфрачервоної Фур'є-спектроскопії (ІЧ-спектроскопії) дозволяє аналізувати хімічний склад речовин, ґрунтуючись на поглинанні ними світла на певних частотах, характерних для окремих молекулярних груп. Серед переваг методу - висока чутливість, швидкість аналізу та можливість роботи в широкому спектральному діапазоні, хоча його недоліками є висока вартість та складність обладнання. Для досягнення точних результатів необхідно правильно підготувати зразок.

Аналіз діелектричної проникності є також методом для оцінки стану моторних олив, які є багатокомпонентними діелектриками. Цей параметр чутливий до домішок, таких як мийно-диспергуючі та антиокислювальні присадки, а також до продуктів окислення (кислот) і забруднень, що утворюються під час роботи двигуна. Пристрій для вимірювання містить ємнісний датчик, який фіксує зміну тангенса діелектричних втрат, що корелює з рівнем окислення оливи. Однак, суттєвим недоліком методу є те, що вимірюваний сигнал залежить не лише від кислотності, а й від вмісту води та механічних частинок, що ускладнює точне встановлення причини деградації оливи.

Метод електропровідності для контролю моторних олив є способом оцінки їх стану. Цей метод базується на тому, що електропровідність оливи значно змінюється з накопиченням у ній забруднень і продуктів деградації. Пристрої для вимірювання методом електропровідності є простими у використанні, що дозволяє застосовувати їх поза лабораторними умовами, наприклад, в автосервісах. Проте такий метод залежить від температурного фактора та не розрізняє, яка саме домішка спричинила зміну провідності.

Завдяки розумінню механізмів деградації моторної оливи стає можливою розробка нових аналітичних методів [6]. Традиційні методи контролю стану оливи (наприклад, визначення в'язкості, кислотного числа, вмісту металів) є трудомісткими, вимагають спеціального обладнання та лабораторних умов, що ускладнює їхнє оперативне застосування. Тому виникає потреба у розробці швидких, точних та неруйнівних методів оцінки стану моторної оливи, які можна застосовувати безпосередньо під час експлуатації або в умовах автосервісу.

Дослідження деградації моторних олив флуоресцентним методом є актуальною науково-практичною проблемою, оскільки стан оливи безпосередньо впливає на надійність та довговічність двигуна внутрішнього згоряння. З часом під впливом високих температур, тиску, контакту з продуктами згоряння палива та металевими частинками, олива втрачає свої експлуатаційні властивості. Цей процес, відомий як деградація,

призводить до збільшення в'язкості, утворення небажаних домішок і відкладень, що може спричинити серйозне пошкодження двигуна.

У дослідженні [7] флуоресцентна спектроскопія була використана для ідентифікації чотирьох різних мастильних оли. Було виявлено, що мастильні оли мають ароматичні кільця, які флуоресціюють при збудженні світлом, що робить цей метод придатним для виявлення нафтопродуктів у навколишньому середовищі. Дослідження зразків авторами роботи [8] показало, що флуоресценція нафти залежить від її густини: чим менша густина, тим інтенсивніше зразок світиться і довше триває цей процес. Метод флуоресцентної спектроскопії дозволив встановити цей зв'язок, підтверджуючи, що метод є надійним інструментом для характеристики складних речовин.

Автори статті [9] запропонували метод для оцінки виробництва біодизеля з різних рослинних олій, який ґрунтується на вимірюванні їх флуоресценції. Дослідження чотирьох видів олій показало, що флуоресценція біодизеля значно нижча за флуоресценцію початкової олії, що дозволяє відстежувати процес їх перетворення. Це співвідношення інтенсивності флуоресценції може використовуватися як швидкий та точний індикатор для виробництва біодизеля.

В дослідженні [10] за допомогою ІЧ-спектроскопії було розроблено мініатюрну сенсорну систему для оцінки окислення та забруднення водою у різних моторних та гідравлічних оливах. Система успішно розрізняє ці процеси деградації, але вимагає калібрування з урахуванням температури оливи та подальших досліджень впливу інших забруднень.

Дослідження деградації моторних оли флуоресцентним методом має прямий зв'язок з декількома важливими науковими та практичними завданнями. Флуоресцентний аналіз дозволяє вивчати утворення нових флуоресцентних сполук (продуктів окислення), які є маркерами деградації. Це допомагає краще зрозуміти хімічні та фізичні процеси старіння оливи. Розробка методик, що дозволяють швидко оцінити ступінь зносу оливи, дає можливість перейти від планової до діагностичної заміни оливи. Це допомагає уникнути передчасних замін, зменшити витрати та екологічне навантаження, а також запобігти поломкам двигуна. Флуоресцентний метод може бути використаний для контролю якості нових оли та виявлення можливих фальсифікацій. Аналіз таким методом полягає в порівнянні інтенсивності флуоресценції невикористаної оливи з інтенсивністю використаної. Вимірюючи різницю в амплітудах флуоресценції на певних довжинах хвиль, можна визначити ступінь окислення оливи.

ФОРМУЛЮВАННЯ ЦІЛЕЙ СТАТТІ

Метою статті є дослідження процесів деградації синтетичної моторної оливи у процесі експлуатації автомобіля методом флуоресцентної спектроскопії, а також пошук інформативних критеріїв оцінки технічного стану моторної оливи.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Синтетична мастильна олива, що використовуються в двигунах внутрішнього згорання, була досліджена за допомогою флуоресцентної спектроскопії. Об'єктом дослідження були зразки синтетичної моторної оливи марки Genuine dexos 2 5W-30 (General Motors, Німеччина). Один зразок - це свіжа моторна олива в стані постачання від виробника, а чотири зразки - після пробігу в автомобілі Toyota Camry з дистанціями 180, 430, 720 та 910 км. Для спектрофотометричних вимірювань зразки моторної оливи об'ємом по 0,5 мл відбиралися із щупа показника рівня оливи двигуна та зберігалися під час вимірювань у пластикових спектрофотометричних кюветах типу «мікро» (Biosigma, Італія) з герметичною кришкою із фторопласту. Кювети були виготовлені з прозорого поліметилметакрилату (ПММА), який добре пропускає світловий потік в діапазоні довжин хвиль від 300 до 900 нм. Кювети з такого матеріалу мають дуже високу хімічну стійкість. Габаритні розміри такої кювети становили 4,42×1,23 см, а максимальний об'єм 2,5 мл. Довжина оптичного шляху кожної спектрофотометричної кювети для збуджувального флуоресценцію світла становила 4 мм, а для світла емісійного - 10 мм.

Вимірювання спектрів флуоресценції виконували на флюориметрі FluoroTest (Рис.1) розробленому в Інституті фізики напівпровідників ім. В.Є.Лашкарьова НАН України. Флюориметр FluoroTest [11] містить напівпровідникові лазери потужністю до 50 мВт з довжинами хвиль опромінення 405 нм, 532 нм та 650 нм і світлодіодні джерела опромінення з довжинами хвиль 365 нм, 470 нм, 525 нм та 635 нм.

Даний метод контролю окислення оливи базується на оцінці її флуоресценції, яку вимірюють одночасно в трьох спектральних діапазонах. Він дозволяє оперативно оцінити ступінь старіння оливи, порівнюючи інтенсивність свічення нової та використаної.

Чутливий елемент - ПЗЗ-матриця, діапазон довжин хвиль реєстрації флуоресценції 390-800 нм з кроком 0,5 нм. Дозволяє працювати зі стандартними спектрометричними кюветами та твердотільними зразками. Для збудження флуоресценції використовували випромінювання з довжиною хвилі 532 нм від напівпровідникового лазера потужністю 10 мВт. Спектри флуоресценції для досліджуваних зразків синтетичної моторної оливи вимірювали в діапазоні довжин хвиль 550...750 нм з кроком 0,5 нм, щоб не захоплювати смугу збудження, тобто довжини хвиль в околі 532 нм.



Рис. 1. Зовнішній вигляд приладу «FluoroTest»

Кислотне число зразків олив визначали титруванням з використанням титратора (розчину гідроксиду калію) відповідно до ISO 6618. Для визначення переходу середовища з кислотного у нейтральне, тобто нейтралізації кислотних сполук гідроксидом калію, титрування виконували із-за допомогою вимірювача кислотності, а саме рН-метра. Потенціометричне титрування із використанням рН-електрода має ряд переваг у порівнянні з індикаторним титруванням, а саме: висока точність, цифрове представлення результату та можливість роботи із забарвленими зразками олив. Для дослідження використовували комерційний рН-метр PHS-3C (Shanghai Puchun Measure Instrument Co., Ltd., Китай), який призначений для лабораторного використання та забезпечує вимірювання рівня кислотності (рН) і температури досліджуваних розчинів. Прилад оснащений змінним композитним електродом з BNC-роз'ємом і зовнішнім температурним датчиком. Діапазон вимірювання рН становить від 0 до 14 з роздільною здатністю 0,01 рН і точністю $\pm 0,01$ рН. Температурний діапазон становить від 0 до 100 °С, з роздільною здатністю 0,1 °С і точністю $\pm 0,5$ °С. Прилад оснащено вбудованим мікропроцесором, який обробляє результати вимірювань і відображає їх на дворядковому світлодіодному (LED) дисплеї. Серед функціональних особливостей приладу — автоматична компенсація температури та двоточкове автоматичне калібрування, що забезпечують точність і зручність у роботі. Для титрування використовували цифрову бюретку Continuous (VITLAB, Німеччина) яка призначена для титрувальних розчинів з концентрацією до 1 моль/літр та має діапазон дозування від 10 мкл до 1 літра. Об'єм дозування за один оберт маховика становить 2,5 мл. Відносна похибка вимірювання становить $\pm 0,2\%$. Дана цифрова бюретка має сертифікат відповідності за DIN EN ISO 12600. Для титрування був підготовлений розчин гідроксиду калію (калію гідроксид, чда, Хімлаборреактив, Україна) концентрацією 0,1 моль/літр, а зразки моторної оливи для титрування брали вагою по 2 г. Для використання меншого об'єму досліджуваного зразку моторної оливи використовували електрод зі зменшеним діаметром (6 мм) та резервуар для оливи з внутрішнім діаметром 10 мм виготовлений з політетрафторетилену.

Результати та обговорення

Виконували почергове титрування відібраних із двигуна автомобіля зразків моторної оливи та визначали об'єм розчину гідроксиду калію необхідного для нейтралізації кислотних іонів. Результати титрування наведені в Таблиці 1. Також в таблиці крім вимірюного об'єму титрувального розчину наведено розрахована вага гідроксиду калію та кислотне число.

Таблиця 1

Результати вимірювання та розрахунків параметрів зразків синтетичної моторної оливи

№	Пробіг, км	Об'єм КОН, мл	Вага КОН, мг	КЧ, мгКОН/г	I ₅₈₄ , абс.од.	I ₆₁₀ , абс.од.	K _{дмоп} , від.од.
1	0	0,33	1,84	0,92	167	149	0,892
2	180	0,38	2,12	1,06	41	49	1,195
3	430	0,45	2,50	1,25	31	45	1,452
4	720	0,49	2,76	1,38	15	21	1,403
5	910	0,55	3,10	1,55	10	13	1,299

Залежність вимірюної величини кислотного числа від пробігу автомобіля наведена на рисунку 2. Вона добре апроксимується лінійною функцією $y(x)=kx+b$ з коефіцієнтом узгодження $R^2 = 0,9953$ для якої $k = 6,65 \times 10^{-4}$, а величина $b = 0,934$.

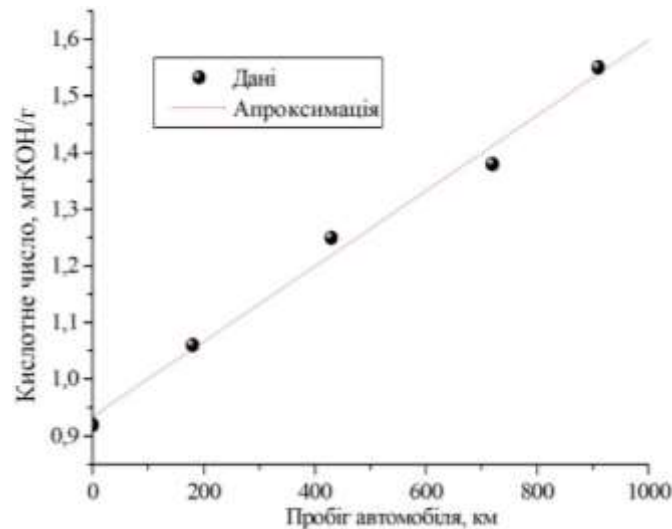


Рис. 2. Залежність кислотного числа синтетичної моторної оливи марки General Motors genuine dexos 2 5W-30 від пробігу автомобіля

Виміряні спектри флуоресценції наведені на рисунку 3. З рисунку видно, що зі зростанням тривалості пробігу автомобіля інтенсивність флуоресценції різко спадає, причому це спадання не є лінійним.

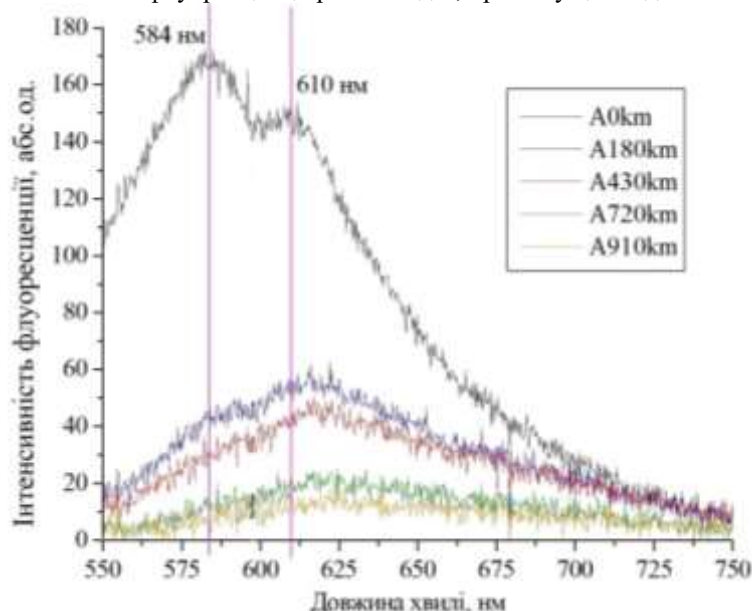


Рис. 3. Виміряні спектри флуоресценції зразків синтетичної моторної оливи марки General Motors genuine dexos 2 5W-30 свіжої (A0km) та після пробігу в автомобілі 180, 430, 720 та 910 км

Крім того на спектрі флуоресценції свіжої моторної оливи вирізняються два піки на довжинах хвиль 584 нм та 610 нм, які мають різні інтенсивності емісії фотонів. Більш короткохвильовий пік має більшу інтенсивність, ніж довгохвильовий. Зі збільшення пробігу не тільки спадає інтенсивність флуоресценції у всьому вимірюваному діапазоні довжин хвиль, а й змінюється перерозподіл інтенсивності емісії для вище наведених спектральних піків. Для відпрацьованої моторної оливи короткохвильовий пік стає меншим по інтенсивності, ніж довгохвильовий. Тому для оцінки ступеня деградації моторної оливи можна ввести коефіцієнт пропорційності, за величиною якого можна буде оцінювати ступінь деградації моторної оливи, в тому числі і кислотне число. Коефіцієнт пропорційності буде визначатись як співвідношення інтенсивності на довжині хвилі 610 нм до інтенсивності на довжині хвилі 584 нм.

Таким чином для використаного моторної оливи значення коефіцієнту буде суттєво відрізнятись від його значення для свіжої оливи. В таблиці 1 наведені розрахункові значення цього коефіцієнту, який ми позначили $K_{\text{дмо}}$, а також значення інтенсивності флуоресценції на довжинах хвиль 584 нм та 610 нм. Також з Таблиці видно, що значення кислотного числа зростає нелінійно, що пов'язано з збільшенням потрапляння у двигун автомобіля продуктів теплового розкладу присадок, води та бруду. Зі зростанням кислотного числа пропорційно зростає і введений коефіцієнт деградації моторної оливи, але для пробігу більшому за 430 км

ця пропорційність порушується. Причиною такого явища може бути гасіння флуоресценції через термічне розкладання присадок та потрапляння води. Графік залежності кислотного числа від коефіцієнту деградації моторної оливи для пробігу автомобіля до 500 км наведено на рисунку 3. Також на рисунку показано апроксимуючу функцію лінійної регресії методом найменших квадратів.

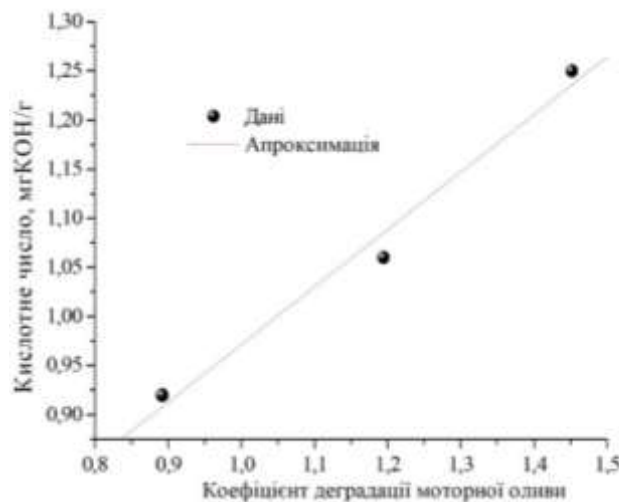


Рис. 4. Графік залежності кислотного числа від коефіцієнту деградації синтетичної моторної оливи марки General Motors genuine dexos 2 5W-30 для пробігу автомобіля до 500 км

Графік залежності вимірної величини кислотного числа від коефіцієнту деградації моторної оливи добре апроксимується лінійною функцією $y(x)=kx+b$ з коефіцієнтом узгодження $R^2 = 0,9913$ для якої $k = 0,5855$, а величина $b = 0,3859$.

ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМІ

Встановлено, що зі збільшенням пробігу автомобіля кислотне число синтетичної моторної оливи Genuine dexos 2 5W-30 зростає, що відображає накопичення продуктів термічного розкладу присадок, води та забруднень. Інтенсивність флуоресценції оливи зменшується з пробігом, причому характер зміни є нелінійним і супроводжується перерозподілом інтенсивностей піків при 584 нм та 610 нм.

Запропоновано коефіцієнт деградації моторної оливи ($K_{\text{дмо}}$), який може слугувати індикатором її старіння та корелює з кислотним числом.

Виявлено сильну лінійну залежність між кислотним числом і коефіцієнтом деградації оливи для пробігу до 500 км ($R^2 = 0,9913$), що підтверджує можливість використання спектроскопічних методів як альтернативи класичним титриметричним.

Розбіжності між залежностями при подальшому зростанні пробігу (понад 500 км) можуть бути зумовлені процесами гасіння флуоресценції через руйнування присадок та вплив зовнішніх факторів.

Дослідження викладені в даній роботі корисні для розробки портативних оптико-електронних сенсорних систем для експрес-діагностики стану моторної оливи не лише в лабораторних умовах, а й безпосередньо в польових умовах.

Література

1. Кравець І.А., Трофімов І.Л., Коваль О.Д. Зміна експлуатаційних властивостей моторних олив у процесі їх роботи. *Journal of Mechanical Engineering NTUU "Kyiv Polytechnic Institute"*. 2011. № 62. С. 168–171.
2. ДСТУ 9032:2020. Нафтопродукти. Оливи моторні. Загальні технічні вимоги. [Чинний від 2021–09–01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2020.
3. Лагутін В.В., Зелінський В.Ц., Бурикін О.Б. Випробування електричних машин і трансформаторів в електроенергетичних системах : навч. посіб. Вінниця : ВНТУ, 2010. 115 с.
4. ДСТУ ISO 6618:2015. Нафтопродукти та мастильні матеріали. Визначення кислотного або лужного числа. Метод індикаторного титрування (ISO 6618:1997, IDT). [Чинний від 2016-01-01]. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2015.
5. Бойченко С.В., Толстих Є.В. Аналіз методології дослідження антиокиснювальних властивостей олив і присадок. *Proceedings of National Aviation University*. 2008. № 34.1. С. 155–160.
6. Maslov V.P., Dorozinsky G.V., Khrystosenko R.V., Samoylov A.V., Dorozinska H.V.,

Konchenko A.V. Surface plasmon resonance - a promising method for estimating the quality of motor oil. *Trans & Motauto World Journal*. 2017. № 1. P. 41–44.

7. Morassuti C., Lima S., Dos Santos F., Andrade L. Fluorescence spectroscopy applied in lubricant oils. *Orbital: The Electronic Journal of Chemistry*. 2018. Vol. 10, № 1. P. 1–5. DOI: 10.17807/orbital.v10i1.1032.

8. Falla Sotelo F., Araujo Pantoja P., Lopez Gejo J., Carrillo Le Roux G., Quina F., Nascimento C. Application of Fluorescence Spectroscopy for Spectral Discrimination of Crude Oil Samples. *Brazilian journal of petroleum and gas*. 2008. Vol. 2, № 2. P. 19. DOI: 10.5419/bjpg.v2i2.41.

9. Chimenez T., Magalhães K., Caires A., Oliveira S. Fluorescence as an Analytical Tool for Assessing the Conversion of Oil into Biodiesel. *Journal of fluorescence*. 2012. Vol. 22. P. 1177–1182. DOI: 10.1007/s10895-012-1057-x.

10. Bley T., Pignanelli E., Schütze A. Multi-channel IR sensor system for determination of oil degradation. *Journal of Sensors and Sensor Systems*. 2014. Vol. 3, Iss. 1. P. 121–132. DOI: 10.5194/jsss-3-121-2014.

11. Chegel V.I., Lytvyn V.K., Lopatynskiy A.M., Shepeliavyy P.E., Lytvyn O.S., Goltvyanskyi Yu.V. Plasmon-enhanced fluorometry based on gold nanostructure arrays. Method and device. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics*. 2015. Vol. 18, № 3. P. 272–278. DOI: 10.15407/spqeo18.03.272.

References

1. Kravets, I.A., Trofimov, I.L., & Koval, O.D. (2011). Change of operational properties of engine oils during their service. *Journal of Mechanical Engineering NTUU "Kyiv Polytechnic Institute"*, (62), 168–171.

2. DSTU 9032:2020. Petroleum products. Engine oils. General technical requirements. [Effective from 2021-09-01]. Kyiv: SE "UkrNDNC", 2020.

3. Lahutin, V.V., Zelinsky, V.Ts., & Burykin, O.B. (2010). Testing of electrical machines and transformers in power systems: Textbook. Vinnytsia: VNTU. 115 p.

4. DSTU ISO 6618:2015. Petroleum products and lubricants. Determination of acid or base number. Indicator titration method (ISO 6618:1997, IDT). [Effective from 2016-01-01]. Kyiv: SE "UkrNDNC", 2015.

5. Boychenko, S.V., & Tolstykh, Ye.V. (2008). Analysis of the research methodology of antioxidant properties of oils and additives. *Proceedings of National Aviation University*, (34.1), 155–160.

6. Maslov, V.P., Dorozinsky, G.V., Khrystosenko, R.V., Samoylov, A.V., Dorozinska, H.V., & Konchenko, A.V. (2017). Surface plasmon resonance – a promising method for estimating the quality of motor oil. *Trans & Motauto World Journal*, (1), 41–44.

7. Morassuti C., Lima S., Dos Santos F., & Andrade L. (2018). Fluorescence spectroscopy applied in lubricant oils. *Orbital: The Electronic Journal of Chemistry*, 10(1), 1–5. <https://doi.org/10.17807/orbital.v10i1.1032>.

8. Falla Sotelo, F., Araujo Pantoja, P., Lopez Gejo, J., Carrillo Le Roux, G., Quina, F., & Nascimento, C. (2008). Application of fluorescence spectroscopy for spectral discrimination of crude oil samples. *Brazilian Journal of Petroleum and Gas*, 2(2), 19. DOI:10.5419/bjpg.v2i2.41.

9. Chimenez, T., Magalhães, K., Caires, A., & Oliveira, S. (2012). Fluorescence as an analytical tool for assessing the conversion of oil into biodiesel. *Journal of Fluorescence*, 22, 1177–1182. <https://doi.org/10.1007/s10895-012-1057-x>

10. Bley, T., Pignanelli, E., & Schütze, A. (2014). Multi-channel IR sensor system for determination of oil degradation. *Journal of Sensors and Sensor Systems*, 3(1), 121–132. <https://doi.org/10.5194/jsss-3-121-2014>

11. Chegel, V.I., Lytvyn, V.K., Lopatynskiy, A.M., Shepeliavyy, P.E., Lytvyn, O.S., & Goltvyanskyi, Yu.V. (2015). Plasmon-enhanced fluorometry based on gold nanostructure arrays. Method and device. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics*, 18(3), 272–278. <https://doi.org/10.15407/spqeo18.03.272>.