

О. В. Орисенко¹
А. І. Криворот¹
М. В. Шаповал¹
М. О. Скорик¹

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗМАЩУВАЛЬНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МОТОРНОЇ ОЛИВИ NISSAN MOTOR OIL 10W–30 ЗА КРИТЕРІЄМ МІЦНОСТІ АДСОРБОВАНОЇ ПЛІВКИ

¹Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Полтава

Розглянуто актуальні питання оцінки змащувальних властивостей моторної оливи залежно від температурних умов експлуатації та рівня її зношування, спричиненого пробігом автомобіля.

Наведено результати експериментальних досліджень, метою яких є визначення зусилля розриву адсорбованої на поверхнях тертя масляної плівки моторної оливи Nissan Motor Oil 10W–30.

Для цього розроблено спеціальну машину тертя, яка здатна створювати максимально близькі до реальних умови роботи такого вузла як вал та коромисла клапанів механізму газорозподілу.

В експериментальних дослідженнях варіювались два фактори: температура моторної оливи та пробіг автомобіля. Результати експерименту оброблено методами математичної статистики, отримано рівняння регресії у кодовому та натуральному вигляді, що описує залежність зусилля розриву плівки від досліджуваних параметрів.

Встановлено, що з підвищенням температури моторної оливи зусилля розриву зменшується, а найвищі значення цього показника фіксуються приблизно у разі пробігу в 2500 км. Виявлено також, що олива у разі невеликого пробігу автомобіля може демонструвати кращі змащувальні властивості, ніж нова, що пояснюється накопиченням у ній продуктів згоряння, які мають підвищену дипольність та певною мірою поліпшують її здатність до адсорбції на металевих поверхнях.

На основі дослідження сформульовано практичні рекомендації щодо оптимізації періодичності заміни моторної оливи, зокрема важливість дотримання регламенту виробника та можливість часткового змішування нової оливи з невеликою кількістю старої для поліпшення змащувальних властивостей. Отримані результати можуть бути використані для удосконалення методів експлуатаційної діагностики технічного стану автомобільного двигуна.

Ключові слова: моторна олива, діагностика оливи, змащувальні властивості, розрив масляної плівки, машина тертя, пробіг автомобіля.

Вступ

Надійна та довговічна робота кожного технічного об'єкта, вузли якого потребують змащення, можлива лише за умови застосування мастильних матеріалів з відповідними експлуатаційними властивостями та якісними показниками.

Проте, навіть застосування якісних та рекомендованих виробником мастильних матеріалів не гарантує забезпечення надійного змащення протягом заявленого терміну, оскільки в процесі експлуатації на них діє низка чинників, під впливом яких початкові властивості мастильних матеріалів поступово втрачаються і з часом досягають такого рівня, що виконання ними своїх функцій на належному рівні стає неможливим.

Підтримання змащувальних властивостей мастильних матеріалів на потрібному рівні протягом терміну експлуатації досягається періодичною їх заміною. Оскільки швидкість зміни вказаних властивостей значною мірою залежить від умов роботи вузла чи агрегату, то встановлення оптимальних термінів заміни, які б враховували ці умови, є актуальним питанням.

В свою чергу, встановлення таких термінів можливе лише за умови періодичного моніторингу

стану мастильного матеріалу в конкретних умовах експлуатації вузла чи агрегата. Вирішення цього питання можливо із застосуванням методів та засобів, що дозволяють перевірити один або декілька якісних показників мастильного матеріалу без значних затрат на проведення дослідження в умовах експлуатації.

Аналізуючи умови роботи моторних олив, дійшли висновку, що між контактуючими поверхнями деталей двигуна внутрішнього згоряння в різні періоди його роботи виникають практично всі відомі види змащення — починаючи від змішаного чи граничного, наприклад, в період пуску, роботі на малих обертах чи значному навантаженні, і завершуючи гідродинамічним за оптимального навантаження та достатній для цього кількості обертів [1], [2].

Граничне змащення характеризується недостатньою для утворення рідинного тертя кількістю мастильного матеріалу між контактуючими поверхнями, і його механізм полягає у тому, що навантаження сприймається тонкою адсорбованою захисною плівкою, яка протидіє своєму витісненню та запобігає безпосередньому контакту поверхонь тертя.

Враховуючи цей факт можемо підсумувати, що змащувальні властивості моторної оливи за умови граничного тертя будуть визначатись міцністю та товщиною адсорбованої плівки.

Механізм утворення такої плівки сучасні уявлення теорії триботехніки пояснюють явищем фізичної чи хімічної адсорбції [3], [4]. Фізична адсорбція обумовлена тим, що дипольні молекули мастильного матеріалу адсорбуються на металевих поверхнях за рахунок сил електростатичного притягання (сили Ван дер Ваальса). Хімічна адсорбція виникає в результаті утворення хімічних зв'язків між адсорбованими молекулами та поверхневим адсорбентом.

Як відомо [4], молекули вуглеводнів, що входять до складу мінеральних олив та молекули вуглеводневих синтетичних мастил мають дуже слабо виражені дипольні властивості, що визначає їхні низькі змащувальні властивості у разі граничного тертя. З метою покращення цих властивостей до олив додають присадки [4], які з часом спрацювуються і змащувальні властивості мастильного матеріалу знижуються. Зі зменшенням рівня впливу присадок до певної межі мастило необхідно замінити.

Сьогодні існує низка способів визначення якісних показників моторної оливи, серед яких найпоширенішим є випробування на чотирикульковій машині тертя [5]. Цей спосіб дозволяє визначити доволі широкий спектр властивостей рідких та пластичних мастильних матеріалів. Це такі як протизношувальні, антизадирні та антифрикційні. Проте, зазначений спосіб має недолік, одним із яких є можливість дослідження змащувальних властивостей лише в точці контакту кульок, а реальні механізми мають складніші контактні поверхні. З метою уникнення цих недоліків застосовують машини, у яких робочі поверхні виконано такими, що вони максимально наближено моделюють умови роботи пар тертя реальних вузлів та агрегатів. Це такі машини як «кулька – диск», «штифт – диск», «штифт – пластина» та ряд інших [6]–[8].

Також з метою максимального наближення до умов, що виникають під час роботи реального вузла застосовуються імітаційні методи, в яких використовують машини тертя, що мають робочі поверхні у вигляді серійних деталей [9]–[11]. Цей метод дає можливість отримати найточніші результати. Отже, на погляд авторів, у дослідженні зміни змащувальних властивостей моторної оливи протягом терміну її використання доцільно застосовувати машину тертя, яка імітує умови роботи поверхонь тертя двигуна внутрішнього згоряння, які знаходяться в найнесприятливіших умовах.

Метою статті є висвітлення результатів дослідження зміни змащувальних властивостей моторної оливи залежно від тривалості її використання за допомогою імітаційної машини тертя, яка максимально близько моделює умови роботи такого вузла як кулачки розподільчого валу та коромисла клапанів. В цих вузлах, на відміну від підшипників колінчастого чи розподільчого валів забезпечити рідинне мащення конструктивно досить складно, отже існує висока ймовірність їх роботи в умовах недостатньої кількості мастильного матеріалу, особливо в період пуску, і, як зазначалось раніше, спрацювання поверхонь та втрати енергії на тертя у цьому випадку залежатимуть від міцності адсорбованої плівки. Враховуючи, що під час пуску, наприклад автомобільного двигуна, відбувається спрацювання, яке за різними оцінками еквівалентне 180...200 км (і навіть більше) пробігу автомобіля [12], можемо стверджувати, що знання зміни цього показника протягом періоду між заміною моторної оливи та можливість його періодичного контролю протягом цього періоду дозволить збільшити міжремонтний термін вузла в цілому.

Результати дослідження

Пропонується визначати якість оливи за таким показником, як руйнування адсорбованої масляної плівки, тобто той випадок, коли під дією зовнішнього навантаження гранична плівка руйнується та повністю витискається з між поверхонь тертя [13]. Оскільки, у цьому випадку тертя від граничного переходить до сухого і коефіцієнт тертя між робочими поверхнями різко зростає, то критерієм здатності плівки витримувати навантаження взято момент схоплювання поверхонь тертя під дією нормально прикладеної сили, з якою відбувалось їхнє притискання одної до іншої.

З метою встановлення зміни цього показника залежно від тривалості використання моторної оливи проведено дослідження із застосуванням імітаційної машини тертя (рис. 1).

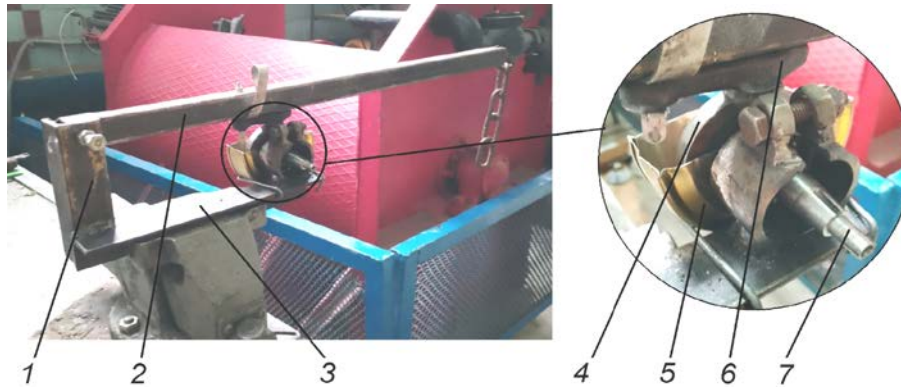


Рис. 1. Установка для визначення моменту схоплювання

Основними конструктивними елементами цієї установки є диск 4, який може обертатись навколо своєї осі під дією крутного моменту приводу, що підводиться за допомогою валу 7, та важільний механізм, до складу якого входить важіль 2 з закріпленим на ньому коромислом механізму газорозподілу 6. Важільний механізм служить для створення зусилля притискання між коромислом 6 та торцевою поверхнею диску 4. Вказані елементи конструкції встановлені на основі 3, яка має кронштейн 1. Для імітації умов мащення вузла нижня частина диску 4 занурена в масляну ванну 5.

Як привод використовувався електричний двигун з динамометром. Зусилля притискання визначалось шляхом розрахунку на основі показань динамометра та відношення плечей важеля за схемою (рис. 2). Установка також передбачає проведення дослідів за різних температур мастильного матеріалу за рахунок підігрівання масляної ванни та контролю температури термометром.

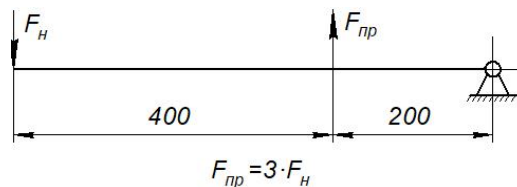


Рис. 2. Принципова схема установки

Ця установка дозволяє змінювати та утримувати на фіксованому рівні такі вхідні фактори як: сила притискання робочих поверхонь коромисла та диска, крутний момент на валу приводу та температуру оливи. Інші показники можна визначити непрямым вимірюванням — методом розрахунку із застосуванням вищеперелічених величин та геометричних розмірів установки.

З метою встановлення залежності міцності адсорбованої масляної плівки від терміну використання моторної оливи проведено дослідження із застосуванням теорії планування експерименту. При цьому застосовано двофакторний план другого порядку, реалізація якого дозволяє отримати математичну залежність у вигляді рівняння регресії. За фактор, який відповідає за термін використання моторної оливи, взято пробіг автомобіля, а як фактор, що відповідає за умови пуску двигуна — температура досліджуваного мастильного матеріалу. Перевірці підлягали зразки моторної оливи Nissan Motor Oil 10W-30 після використання в двигуні внутрішнього згорання за пробігів автомобіля 0,5000 км та 10000 км.

Згідно з прийнятим планом фактори варіювались на трьох рівнях: середньому (основному), нижньому й верхньому, — віддалених від основного на однакову величину [14], [15]. Інтервали варіювання факторів (табл. 1) та значення цих інтервалів (табл. 2) обґрунтовано такими міркуваннями:

– рекомендованим терміном заміни моторної оливи для більшості автомобільних двигунів є пробіг 10000 км. Отже, як інтервал варіювання цього фактора взято пробіг від 0 до 10000 км, що становить нижній та верхній рівні відповідно. У такому випадку рівновіддаленим від вказаних рівнів є пробіг у 5000 км, який і взято за нульовий рівень;

– щодо нижнього рівня фактора, який відповідає за умови пуску, взято середнє значення температури навколишнього середовища у прогнозованих умовах експлуатації транспортного засобу — -10°C . За верхній рівень взято температуру прогрітого двигуна у 90°C . При цьому нульовим рівнем є температура 40°C .

Таблиця 1

Значення інтервалів факторів що варіюються

Фактори	Інтервали варіювання
Пробіг транспортного засобу, км	0...10000
Температура моторної оливи, $^{\circ}\text{C}$	$-10...90$

Таблиця 2

Значення інтервалів варіювання факторів

Код	Значення коду	Значення факторів	
		x_1	x_2
Основний рівень	0	5000	40
Інтервал варіювання	Δx_1	5000	50
Верхній рівень	+	10000	90
Нижній рівень	—	0	-10

Величиною, що досліджується у цьому експерименті взято значення нормальної сили притискування поверхонь тертя.

Згідно зі встановленою практикою планування експериментів, а також для спрощення записів і подальших розрахунків верхній рівень факторів позначено символом «+», середній — «0» і нижній — «—».

Під час проведення експерименту з визначення зусилля, за якого відбувається руйнування адсорбованої масляної плівки, досліди розбивалися на групи таким чином, щоб досліди в нульовій точці були рівномірно розподілені між іншими. Порядок проведення окремих дослідів взято з урахуванням рандомізації. Зокрема, встановлено такий порядок реалізації плану дослідів: 1, 2, 9, 3, 7, 4, 5, 10, 6, 8, 11. Результати реалізації плану експерименту, тобто середні значення зусилля розриву масляної плівки, відповідно з кодовим записом кожного дослідів подано в табл. 3.

Таблиця 3

Середні значення зусилля розриву адсорбованої масляної плівки

№ дослідів	Періодичність варіювання факторами впливу		Зусилля розриву масляної плівки, Н
	x_1	x_2	
1	+	+	234
2	+	—	306
3	—	+	324
4	—	—	372
5	+	0	246
6	—	0	468
7	0	+	246
8	0	—	321
9	0	0	258
10	0	0	257,4
11	0	0	249

Результати дослідів оброблено з використанням методів математичної статистики [14], [15]. У результаті реалізації цього плану експерименту отримуємо алгебраїчне рівняння у вигляді

$$\bar{y}_i = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{12}x_1x_2, \quad (1)$$

де $\bar{y}_i$ — параметр що досліджується. У нашому випадку це зусилля за якого відбувається розрив масляної плівки; x_1, x_2 — вихідні фактори — пробіг транспортного засобу та температура оливи

відповідно; $b_0, b_1, b_2, b_{11}, b_{22}, b_{12}$ — коефіцієнти рівняння.

Визначивши за методикою [14], [15] коефіцієнти та підставивши їх у (1), отримаємо рівняння регресії у кодовому вигляді

$$\bar{y}_i = 271,0658 - 63,0126 \cdot x_1 - 32,5065 \cdot x_2 + 61,676 \cdot x_1^2 - 11,8239 \cdot x_2^2 - 6 \cdot x_1 x_2. \quad (2)$$

В подальшому рівняння (2) уточнюємо шляхом перевірки відмінності коефіцієнтів b_i від нуля за критерієм Стюдента. Перевірка отриманого рівняння за критерієм Фішера підтверджує його придатність для опису досліджуваного процесу.

Для зручності подальших обчислень рівняння (2) приводимо до натурального вигляду (3).

$$P = 0,01303 \cdot S_{\text{пр}} - 0,000024 \cdot t_{\text{оливи}} \cdot S_{\text{пр}} - 0,15176 \cdot t_{\text{оливи}} - 0,00000248 \cdot S_{\text{пр}}^2 - 0,00473 \cdot t_{\text{оливи}}^2 + 286,04. \quad (3)$$

Використовуючи рівняння (3), побудуємо графічні залежності зусилля розриву адсорбованої масляної плівки від двох факторів (рис. 3, 4).

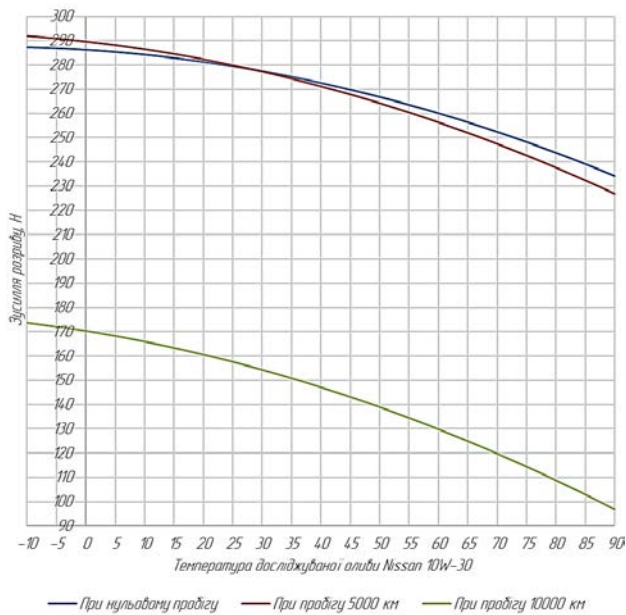


Рис. 3. Графічна залежність зусилля розриву адсорбованої масляної плівки від зміни температури моторної оливи Nissan 10W-30 за фіксованого значення пробігу автомобіля

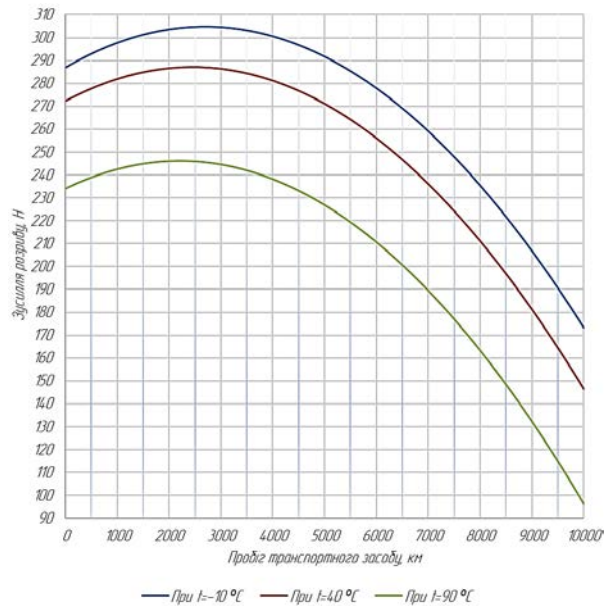


Рис. 4. Графічна залежність зусилля розриву адсорбованої масляної плівки від зміни шляху пробігу автомобіля за фіксованого значення температури моторної оливи Nissan 10W-30

Аналізуючи графіки рис. 3, дійшли висновку, що зусилля розриву адсорбованої масляної плівки моторної оливи Nissan 10W-30 зі збільшенням його температури за сталих значень пробігу автомобіля поступово зменшується. Це можна пояснити впливом підвищеної температури на молекули оливи, який проявляється у зменшенні когезії масляної плівки внаслідок послаблення ван-дер-ваальсової взаємодії та збільшенням рухливості молекул, що зменшує їх здатність створювати стабільний шар на поверхні.

Варто зазначити, що до температури 27 °C, зусилля розриву масляної плівки буде більшим для оливи з пробігом у 5000 км, аніж для нової. Також встановлено, що моторна олива з пробігом у 5000 км за досліджуванним показником майже нічим не поступається оливі без пробігу. Це можна пояснити тим, що у оливі в результаті хімічних процесів, які відбуваються під час її взаємодії з киснем повітря та продуктами згоряння накопичуються хімічні сполуки вуглеводнів та складових присадок, які мають високу дипольність, що і зумовлює значну міцність адсорбованої плівки.

Олива з пробігом автомобіля у 10000 км має найгірші показники розриву масляної плівки і відповідно підлягає заміні.

Графічні залежності (рис. 4) також свідчать про те, що змащувальні властивості за показником розриву масляної плівки спочатку зростають у порівнянні з оливою без пробігу, а потім починають зменшуватись. Найвищі значення зусилля розриву адсорбованої масляної плівки, за всіх досліджуваних значень температур моторної оливи, досягаються приблизно на 2500 км пробігу авто-

мобіля. Таке явище зумовлене активізацією присадок, їх рівномірним розподілом та накопиченням в оливі сполук з високою полярністю.

Висновки

Експериментальні дослідження змащувальних властивостей моторної оливи Nissan Motor Oil 10W–30 за критерієм міцності масляної плівки, що адсорбована на поверхнях тертя, дають можливість підсумувати, що:

- міцність адсорбованої плівки в процесі експлуатації моторної оливи не залишається на постійному рівні, а змінюється за параболічним законом, а саме, спочатку спостерігається підвищення цього показника до певної межі, далі — спадання;
- найбільше значення зусилля розриву і відповідно міцності, досягається у разі пробігу автомобіля в 2500 км, що пояснюється утворенням у оливі сполук з високою дипольністю, які посилюють міцність адсорбованої плівки;
- для оливи у разі пробігу автомобіля в 5000 км зусилля розриву адсорбованої плівки є таким же як і для оливи без пробігу;
- часта заміна оливи (аніж рекомендована заводом виробником) не сприяє поліпшенню виконання нею своїх функцій;
- порушення крайнього терміну заміни оливи сприяє погіршенню умов роботи поверхонь тертя, що спричиняє підвищення втрат енергії та спрацювання деталей.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Ф. І. Абрамчук, Ю. Ф. Гутаревич, К. Є. Долганов, і І. І. Тимченко, *Автомобільні двигуни*. Київ, Україна: Арістей, 2004, 438 с.
- [2] В. Я. Гера, і Ю. В. Шабатура, «Оцінка збільшення ресурсу двигунів внутрішнього згоряння зразків озброєння та військової техніки у результаті впровадження електромеханічної системи змащування», *Зб. наук. пр. Харківського національного університету Повітряних Сил*, № 4 (66), с. 92-99, 2020. <https://doi.org/10.30748/zhups.2020.66.13>.
- [3] Ю. О. Харламов, О. В. Романченко, В. І. Соколов, О. С. Кроль, і О. В. Єпіфанова, *Триботехніка і надійність машин*. Севе́родонецьк, Україна: вид-во СНУ ім. В. Даля, 2021, 184 с.
- [4] М. Ф. Дмитриченко, Р. Г. Мнацаканов, і О. О. Мікосянчик, *Триботехніка та основи надійності машин*. Київ, Україна: Інформавтодор, 2006, 216 с.
- [5] ASTM D2783; *Standard Test Method for Measurement of Extreme-Pressure Properties of Lubricating Fluids (Four-Ball Method)*, PA, USA, 2021.
- [6] ASTM G99; *Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus*. ASTM: West Conshohocken, PA, USA, 2017.
- [7] ASTM D4170-16; *Standard Test Method for Fretting Wear Protection by Lubricating Greases*. ASTM: West Conshohocken, PA, USA, 2017.
- [8] ASTM G133; *Standard Test Method for Linearly Reciprocating Ball-on-Flat Sliding Wear*. ASTM: West Conshohocken, PA, USA, 2016.
- [9] О. М. Коробочка, О. Г. Чернета, і Р. Г. Волощук, «Машина для випробування розподільних валів на тертя та зношування», Патент України *G01N 3/56. № 90410 МПК (2006.01)*, 26.05.2014.
- [10] О. М. Коробочка, О. Г. Чернета, і Р. Г. Волощук, «Машина для випробування розподільних валів на тертя та зношування», Патент України *G01N 3/56. № 104022 МПК (2006.01)*, 12.01.2016.
- [11] М. І. Горбунов, К. О. Кравченко, О. І. Костюкевич, О. Л. Кашура, С. В. Попов, А. І. Фесенко, О. С. Ноженко, В. Д. Черніков, і Ю. Ю. Осенін, «Машина тертя для вивчення фрикційних властивостей контакту "колесо–рейка"», Патент України *G01N 3/40. № 49536 МПК (2009)*, 10.04.2009.
- [12] М. В. Красота, І. В. Шепеленко, І. Ф. Василенко, і В. О. Дубовик, «Зниження пускового зносу автотракторних двигунів зміною параметрів робочого циклу», *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*, зб. наук. пр. Кіровоградського національного технічного університету, вип. 20, с. 197-202, 2008.
- [13] С. В. Воронін, «Трибофізичні основи забезпечення мастильної здатності рідкокристалічних присадок до базових олив.» дис. докт. техн. наук., Хмельницький нац. ун-т, Хмельницький, 2015.
- [14] М. Ф. Дмитриченко, В. П. Матейчик, О. К. Гришук, і М. П. Цюман, *Методи системного аналізу властивостей автомобільної техніки*. Київ, Україна: НТУ, 2014, 168 с.
- [15] М. В. Каргашов, *Імовірність, процеси, статистика*. Київ, Україна: ВПЦ Київський університет, 2007, 504 с.

Рекомендована кафедрою галузевого машинобудування ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 01.05.2025

Орисенко Олександр Вікторович — канд. техн. наук, доцент, завідувач кафедри галузевого машинобудування та мехатроніки, e-mail: oleksandr.orysenko@gmail.com ;

Криворот Анатолій Ігорович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри галузевого машинобудування та мехатроніки, e-mail: anatoliikrivorot@gmail.com ;

Шаповал Микола Віталійович — канд. техн. наук, доцент кафедри галузевого машинобудування та мехатроніки, e-mail: nvshapoval75@ukr.net ;

Скорик Максим Олексійович — старший викладач кафедри галузевого машинобудування та мехатроніки, e-mail: maxym.skoryk@gmail.com .

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Полтава

O. V. Orysenko¹

A. I. Kryvorot¹

M. V. Shapoval¹

M. O. Skoryk¹

The Nissan Motor Oil 10w–30 Lubricating Properties Experimental Studies by the Adsorbed Film Strength Criterion

¹National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic»

The article examines current issues related to assessing the lubricating properties of engine oil depending on operating temperature conditions and the degree of oil degradation caused by vehicle mileage. The paper presents the results of experimental research aimed at determining the rupture force of the oil film adsorbed on the friction surfaces of Nissan Motor Oil 10w–30.

For this purpose, a specialized tribological testing machine was developed to simulate conditions that closely resemble the real operating environment of components such as the valve train, rocker arms, and camshaft. The experiments considered two varying factors: engine oil temperature and vehicle mileage. The obtained data were processed using mathematical statistics methods, resulting in regression equations in both coded and natural form, describing the dependence of oil film rupture force on the studied parameters.

It was found that the rupture force of the engine oil film decreases with increasing temperature, while the highest values of this parameter are observed at approximately 2500 km of mileage. It was also revealed that slightly used oil may exhibit better lubricating properties than new oil due to the accumulation of combustion products with increased dipolarity, which enhances its adsorption ability on metallic surfaces.

Based on the research carried out, practical recommendations have been proposed for optimizing engine oil replacement intervals. These include adhering to the manufacturer's service schedule and mixing a small amount of used oil with new oil to improve lubricating performance. The results can be used to improve diagnostic methods for assessing the operational condition of internal combustion engines.

Keywords: engine oil, oil diagnostics, lubricating properties, oil film rupture, tribological machine, vehicle mileage.

Orysenko Oleksandr V. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Head of the Chair of Industrial Mechanical Engineering and Mechatronics, e-mail: oleksandr.orysenko@gmail.com ;

Kryvorot Anatoliy I. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Chair of Industrial Mechanical Engineering and Mechatronics, e-mail: anatoliikryvorot@gmail.com ;

Shapoval Mykola V. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of the Chair of Industrial Mechanical Engineering and Mechatronics, e-mail: nvshapoval75@ukr.net ;

Skoryk Maksym O. — Senior Lecturer of the Chair of Industrial Mechanical Engineering and Mechatronics, e-mail: maxym.skoryk@gmail.com