

УДК 629.083

DOI: 10.15587/1729-4061.2019.156150

## Дослідження трансмісійних олив автомобілів методом термоокислювальної стабільності підчас експлуатації

**В. В. Аулін, А. В. Гриньків, С. В. Лисенко, І. Л. Роговський, М. І. Черновол, О. Л. Ляшук, Т. М. Замота**

*Розвиток технічної експлуатації засобів транспорту полягає в забезпеченні технічного стану на значному рівні функціональної справності для яких використання якісних мастильних матеріалів є ключовим напрямком. Тому визначення технічного стану трансмісійних олив автомобілів методом термоокислювальної стабільності підчас їх експлуатації є актуальною проблемою.*

*Вирішення проблеми та дослідження технічного стану трансмісійної оливи виконувалось на основі експлуатаційних завдань та результатів їх хімімотологічних досліджень. Вони можуть бути використані підчас розробки системи технічного обслуговування транспортних засобів та обґрунтування доцільності використання відповідних марок олив підчас експлуатації. Розроблено методикку для дослідження, визначення стану і відповідність умовам експлуатації робочих олив за термоокислювальною стабільністю підчас експлуатації транспортних засобів. Дослідження стану трансмісійних олив реалізовано в процесі їх експлуатації на коробках переключення передач вантажних автомобілів марок КамАЗ 6520, MAN TGA 6×4. Проведено дослідження робочої трансмісійної оливи за наступними параметрами: пропускання світлового потоку, випаровуваності, в'язкості. В графічних та аналітичних відображеннях коефіцієнту термоокислювальної стабільності використані результати досліджень пропускання світлового потоку через пробу оливи та її випаровуваності після температурних режимів випробування робочих олив. Визначено зміну коефіцієнту термоокислювальної стабільності оливи відповідної марки від їх відносної в'язкості, аналіз отриманих функції дасть змогу розробляти рекомендації про відповідність робочих олив до умов їх експлуатації.*

*Виявлено, що трансмісійна олива Tedex Gear GL-4 80W90, що експлуатується на автомобілях MAN TGA 6×4, за характеристикою її термоокислювальної стабільності відповідає експлуатаційним умовам. В той час дослідження трансмісійної оливи YUKO TO-4 80W-85 на автомобілях КамАЗ 6520, показало, що дана олива не забезпечує свої функціональні можливості на 8-30 і 45 тис. км. пробігу. Це підтверджується аналізом отриманої математичної моделі зміни термоокислювальної стабільності оливи від відносної в'язкості, а саме виходом її деяких числових значень функції за рівень 0,85 од. на досліджуваному інтервалі пробігу автомобілів.*

*Встановлено, що дані дослідження необхідні для обґрунтування подальшої експлуатації та підбору трансмісійних олив для досліджуваних марок транспортних засобів підчас виконання транспортної роботи на підприємстві*

*Ключові слова: автомобіль, пробіг, трансмісійна олива, термоокислювальна стабільність, фотометрування, випаровуваність, відносна в'язкість, маса проби, умови експлуатації*

## **1. Вступ**

Надійність транспортних машин визначається процесами, що протікають в трибологічних системах "матеріали деталей спряження – олива". Дані системи можуть характеризуватися режимами припрацювання, коефіцієнтом тертя, зносостійкістю і самоорганізацією, що безпосередньо відображається на експлуатаційній працездатності оливи. Комплексна оцінка властивостей олив під час експлуатації створює передумову першочергового вирішення питання підвищення експлуатаційної надійності систем і агрегатів транспортних машин.

В даний час підвищення надійності механічних систем здійснюється шляхом вибору зносостійких конструкційних матеріалів і підбір до них олив. Вибір та застосування зносостійких матеріалів досліджується більш інтенсивно і досягнуто значних успіхів при проектуванні техніки. Вибір мастильного матеріалу для різних спряжень систем і агрегатів машин, що працюють у визначеному інтервалі температур, навантажень і швидкостей відноситься до більш складної проблеми. Це викликано тим, що часто в одному агрегаті застосовується одна марка оливи, а спряження деталей виконані з конструкційних матеріалів, які володіють широким діапазоном механічних властивостей. Крім того, на ринку мастильних матеріалів існує велика кількість олив, застосування яких для різних механізмів транспортних машин має низький рівень обґрунтованості. Ресурс роботи олив на мінеральній, синтетичній і змішаній основах прийнятий постійним і регламентується заводами-виробниками з напрацювання мотогодин або кілометрам пробігу для колісних транспортних машин. Ці параметри не враховують режими і умови експлуатації, технічний стан спряжень деталей, стан та наявність системи фільтрації оливи і його фактичні властивості.

Протікання процесу тертя та зношування в спряженнях деталей під час експлуатації, значною мірою залежить від властивостей мастильного матеріалу. Властивості олив (в'язкісні, окислювальні, фрикційні, диспергуючі і інші) формуються за допомогою добавок і присадок до них під час технологічних операцій їх виробництва. Зміна експлуатаційних властивостей олив обумовлена окислювальними процесами, температурою також механічними деструкціями, хімічними реакціями на матеріалах спряжень деталей, а також продуктами, які утворюються при старінні оливи.

Окиснювання робочої оливи більш інтенсивно протікає на робочих поверхнях спряжень деталей, за рахунок високих температур і каталітичного впливу матеріалів деталей. Даний процес додатково відображає зв'язок та взаємовплив елементів трибологічної системи "матеріали деталей спряження - олива" на експлуатаційну надійність систем і агрегатів транспортних машин в цілому. В зв'язку з цим важливе практичне значення має визначення стану робочих олив методом контролю їх термоокислювальної стабільності. Діагностика цієї властивості трансмісійної оливи дає змогу вдосконалення та можливості формуван-

ня раціональної діагностичної бази даних про технічний стан силового агрегату транспортних машин, що є актуальною науково-технічною проблемою.

## **2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми**

Окислювальні процеси, в оливі, як правило, оцінюються по кислотному числу і для деяких сортів олив стандартизовані. Аналіз патентної і науково-технічної літератури показав, що існує велика різноманітність інженерних методів і пристроїв оцінки термоокислювальної стабільності. В якості основних показників пропонуються: величина зміни в'язкості, електропровідність, кількість відкладень на деталях, питома потужність діелектричних втрат в присутності та відсутності каталізатора, коефіцієнт поглинання світлового потоку [1]. Допоміжними не менш важливими показниками оливи є: період осадкоутворення, схильність до лакоутворення, оптична щільність, концентрація нерозчинних продуктів забруднення, масові частки робочої фракції і лаку, випаровуваність, корозійні властивості та ін. [2]. Однак більшість перелічених показників не знайшло практичного застосування через відсутність промислових стандартизованих засобів контролю. Частина показників дослідження стану оливи вимагає використання дорогого обладнання і застосовується тільки в лабораторних умовах.

Використання експрес-методів дослідження спряжень деталей вузлів та агрегатів на основі триботехнічних випробувань висвітлено в роботі [3]. Визначення абразивних частинок у середовищі є важливим завданням, що реалізоване з використанням машин тертя, але авторами не запропоновано вирішення проблеми визначення кількості та розміру абразивних частинок підчас експлуатації. Питання застосування контролю неруйнівних методів розв'язується на основі аналізу оливи автомобільного вантажного засобу транспорту. Особливу увагу приділено контролю діелектричної проникності, електромагнітній дефектоскопії олив та іншим діагностичним параметром стану мастильних матеріалів [4]. Актуальність проведення неруйнівного контролю оливи визначається підвищенням ефективності формування діагностичної бази даних агрегатів автомобілів. Подальше вдосконалення технічного сервісу потребує контролювати навантажувальну здатність оливи підчас експлуатації, що не було реалізовано авторами за рахунок контролю технічного стану оливи експрес методами.

На основі сформованих теоретичних та прикладних аспектів дослідження стану оливи часто неможливо дати висновок про працездатний стан оливи, що експлуатується в гідросистемах навіть, коли діагностичні параметри знаходяться в межах їх поля допуску [5]. В процесі експлуатації робочих спряжень деталей в оливу потрапляють абразивні частинки, обумовлюючи руйнування та підсилення активації їх поверхневих шарів, що не дає змогу вирішити точні механічні дії у важких умовах експлуатації. Тому колективом авторів було прийняте рішення замінити певні виконавчі механізми пневмо-логічними елементами і тим самим відмовитись від гідромеханічних.

Важливим для технічної експлуатації є прогнозування ресурсу агрегатів транспортних машин [6]. Для розв'язання цієї проблеми необхідно вчасно та якісно проводити діагностування агрегатів та виконувати необхідні операції те-

хнічного сервісу, що було запропоновано вирішувати за допомогою магнітних датчиків і онлайн контролю стаціонарних силових установок. Натомість подальшої реалізації для мобільних машин дані методи не знайшли свого застосування. А також не можливо на їх основі розробляти рекомендації стосовно відповідності робочих оливи до умов експлуатації.

Основною причиною виходу з ладу силових агрегатів є збільшення величини зношування та процес деградації розхідних матеріалів [7]. Комплексно ці процеси можуть контролюватися на основі діагностики оливи за її спектральним аналізом, але їх фактичне значення та етапи протікання важко оцінити. Для вирішення цього виконується аналіз діагностичних даних та будується модель простору станів спряжень деталей силових агрегатів машин. Щодо діагностичних даних працездатності оливи в зоні міжграничних значень концентрації продуктів зношування, у зв'язку з неможливістю комплексного врахування характеристик робочих оливи за рахунок спектроскопії оливи на їх реакцію температурного режиму. Тому діагностичні дані силових агрегатів в прогнозованому періоді можуть мати викиди значень.

Надійність та ресурс колісних транспортних машин в цілому залежать від технічного стану їх силових агрегатів. Близько 25 % транспортних компаній заявляють, що вони зіштовхуються з відмовою коробок перемикачів передач, що пов'язані зі станом оливи [7]. Ці відмови більш за все пов'язані з екстремальними режимами експлуатації, підвищеними робочими температурами, які призводять до збільшення концентратів напруженості на робочих поверхнях сальників, підшипників і зубів шестерень. Збільшення концентратів напружень стимулює висока окиснюваність оливи та швидкий її вихід з працездатного стану. Добавки і присадки захищають ущільнення і поліпшення теплового і окисного балансів та в'язкісну стабільність [8]. Вирішення цих проблем виконували за рахунок використання екологічно чистих оливи з певним комплексом присадок, що мають менший агресивний вплив на спряження деталей. Але для їх впровадження в експлуатацію необхідно розробляти систему контролю, що буде характеризувати адекватну модель зміни технічного стану робочих оливи.

Використання оливи, що не відповідає технічним умовам, невчасна діагностика і заміна оливи сприяють швидкому її окислюванню та розвитку мікропітингу деталей, що може привести до поломки агрегату [9]. Вирішення цих питань виконували на основі розробки комплексу присадок для оливи, але контроль під час експлуатації авторами не виконувався. Для попередження виникнення таких проблемних ситуацій необхідно розробити методику контролю технічного стану за термоокислювальною стабільністю.

Використання екологічно чистих оливи, що сприяє досягненню енергетичної незалежності та безпеки через їх природне відновлювання ресурсу не є завжди ефективним. Однак їх використання обмежене низкою термоокислювальною стабільністю і незадовільними властивостями під час холодного періоду експлуатації систем і агрегатів транспортних машин [10]. Підвищення якості робочої екологічно чистих оливи сприяють пошуку комбінації присадок на основі системного підходу. Зазначене відображає необхідність створення і використання оливи з високою термоокислювальною стабільністю. Разом з тим пи-

тання контролю оливи за показником термоокислювальної стабільності під час експлуатації не вирішено, що є дуже важливим показником впровадження таких оливо у виробництво та розробки рекомендації стосовно їх відповідності.

Мінеральні оливи при важких умовах експлуатації значно піддаються окисним реакціям, що викликані доступом кисню, води і абразивних частинок металу, що впливають на продуктивність оливи [11]. Авторами були проведені дослідження зміни окислення оливи з використанням антиоксидантів і металевих пасиваторів для оцінки і порівняння їх термоокислювальної стабільності. Контроль термоокислювальної стабільності виконувався за рахунок дослідження кислотного числа і вмісту вуглецевих кластерів в окислених зразках оливи у вигляді осаду, що не досить точно відображало зміну та спрацювання присадок та фракцій оливи. А експлуатаційна реалізація за такою схемою вимагає значних часових втрат на проведення одиничного дослідження технічного стану оливи.

Задовільні трибологічні та екологічні властивості мають екологічно чисті рослинні оливи, але натомість вони володіють відсутністю у них повної термічної та гідролітичної стійкості [12]. В роботі колектив авторів проводили дослідження визначення впливу термічного окислення оливи на її мастильні та фізико-хімічні властивості. Для оцінки швидкості окислення оливи введено метод спектроскопії видимого світла, але даний метод не дає можливість комплексно описати процес зміни температурної стійкості досліджуваної оливи, а тільки фіксує початкові моменти структурної її зміни.

Тому на даний момент для агрегатів трансмісії, з рідинним мащенням, мобільних машин необхідно розробляти методики дослідження технічного стану оливи, на основі яких можна говорити про їх відповідність умовам експлуатації. Дані рекомендації більш детально можна розробляти при впровадженні комплексних методик визначення термоокислювальної стабільності робочих оливо.

### **3. Мета та задачі дослідження**

Метою дослідження є виявлення закономірностей зміни термоокислювальної стабільності робочої оливи та розробка методу оцінки її працездатного стану, що дасть можливість вдосконалити систему технічної експлуатації машин та розробляти рекомендації про відповідність оливо до умов експлуатації.

Для реалізації поставленої мети вирішували наступні завдання:

- розробити методику дослідження стану оливи за термоокислювальною стабільністю та сформулювати необхідні аналітичні вирази для її реалізації;
- отримати закономірності зміни характеристик процесу окислення трансмісійної оливи під час експлуатації;
- обґрунтувати доцільність використання трансмісійної оливи на основі дослідження їх стану за термоокислювальною стабільністю.

### **4. Матеріали і методи дослідження стану трансмісійної оливи вантажного автомобіля**

Для дослідження стану було обрано наступні марки оливи YUKO TO-4 80W-85 (відповідність SAE 80W-85, API GL-4) з характеристиками: 1) кінема-

тична в'язкість при 100 С, мм<sup>2</sup>/с – 12.0; 2) густина при 20 С, кг/м<sup>3</sup> – 890; 3) індекс в'язкості – 95; 4) температура спалаху у відкритому тиглі, С – 225; 5) температура застигання, С – -25. Tedex Gear GL-4 80W90 (відповідність SAE 80W-90, API GL-5) з наступними характеристиками: 1) кінематична в'язкість при 100 С, мм<sup>2</sup>/с – 14.6; 2) густина при 20 С, кг/м<sup>3</sup> – 920; 3) індекс в'язкості – 105; 4) температура спалаху у відкритому тиглі, С – 228; 5) температура застигання, С – -33. Відбір проб марок оливи даних здійснювали з колісних транспортних машин КамАЗ 6520 (3 шт.) та MAN TGA 6×4 (3 шт.), що виконували транспортну роботу в АТП 2004, м. Кропивницький, Україна. Проби відбирали при кожному технічному обслуговуванні №2 по 250 мл. (для трьох повторень по 40 мл.) оливи з кожної коробки переключення передач згідно ДСТУ 4488:2005. Місцями для відбору проб були відповідно мірні та заливочні місця оливи в коробках переключення передач відповідної марки транспортної машини.

Для дослідження термоокисної стабільності використовували прилад для визначення термоокислювальної стабільності ТОС-10 (НТК "Електронприлад") зображений на рис. 1, який складається з механічного і електричного блоків. Механічний блок містить скляний стакан, на якому встановлено нагрівач, ізолюваний від зовнішнього середовища теплоізоляцією і розміщено в корпусі та виконано з ручкою. Вивід нагрівача через штекер з'єднаний з електричним блоком. Скляна ємність з випробовуваним зразком встановлюється на платформі з шарнірами і можливістю її зняття. У верхньому положенні платформа фіксується. При цьому в ємність занурюється термopара і скляна мішалка, з'єднана з електродвигуном, що забезпечує її обертання. Електричний блок складається з терморегулятора ТРМ-200, джерел живлення нагрівача і мікродвигуна.

Ваги лабораторні ТВЕ-0,21 рис. 1,в з максимальною масою зважування 300 г. і величиною похибки в межах 0,01 г. Дані ваги необхідні для вимірювання маси випаровуючої оливи. Вимірювання маси проби оливи виконується перед кожним початком і завершенням процесу окислення.

Фотометричне обладнання призначене для оцінки забрудненості гідравлічних, індустриальних, моторних і трансмісійних олив. Показником оцінки олив при цьому є коефіцієнт поглинання світлового потоку. Фотоелектричний пристрій КФК-2 рис.1,б. складається з оптичного і вимірювального блоків Оптичний блок призначений для прямого фотометрування олив різної прозорості. Фотометрична кювета призначена для створення фотометруючого шару оливи заданої товщини. При експериментальному визначенні коефіцієнту поглинання світлового потоку використовували кювети, довжиною 3 мм. Прилад пропускає стабілізований монохроматичний світловий потік через шар досліджуваної оливи на фотоприймач.



*а*



*б*



*в*



*г*

Рис. 1. Прилади для дослідження термоокислювальної стабільності олив:  
*а* – лабораторний прилад термоокислення оливи ТОС-10 (Україна);  
*б* – колориметр фотоелектричний концентрацій КФК-2 (Росія);  
*в* – лабораторні ваги ТВЕ-0,21 (Україна); *г* – віскозиметр ВПЖТ-2 (Україна)

В залежності від концентрації механічних домішок і продуктів окислення оливи на фотоприймач падають різні світлові потоки, обернено пропорційні концентрації домішок. Вимірювання оптичної щільності оливи проводили на пристрої КФК-2, який дозволяє виміряти оптичну щільність в межах від 0 до 2 од. Фотометрування оливи проводили при довжині оптичної хвилі 440 нм. Коефіцієнт чутливості в режимі 2 визначали через 15–20 хв. після включення приладу. Під час прогріву кюветне відділення було відкритим. Робочі поверхні кювет перед кожним вимірюванням протирали спиртоєфірною сумішшю. В мірну колбу наливали 40 мл. нової оливи та розбавляли 4 мл. розчинником (бензол). Суміш перемішували та розливали в кювети три проби по 10мл.. Сформовані проби чистої оливи необхідні для встановлення стрілки фотокolorиметра на нульовій позначці. При зміщенні стрілки від нульового положення її підводили до нуля за допомогою обертальної ручки "Установка 10 грубо" та "Точно". Після установки нульового значення для свіжої оливи фотометр готовий для вимірювання робочих олив. Замінивши контрольний розчин оливи в кюветотримачі КМФ-2 на розчин в співвідношенні 40 мл. робочої оливи розбавленої 4 мл. розчинником (бензол), по шкалі приладу визначали оптичну щільність до-

сліджуваної оливи. Повторні вимірювання виконували три рази поспіль, визначаючи середнє значення оптичної щільності оливи.

Відомо, що стійкість робочих олив до окислення визначає їх антиокислювальні властивості. Висока інтенсивність окислення відбувається на поверхнях деталей, нагрітих до високих температур (від 90°C). Випробування на термоокислювальну стабільність проводили на приладі, що імітує процеси окислення в робочих спряженнях деталей під час експлуатації трансмісійних олив в коробці переключення передач вантажних автомобілів. Процес дослідження на термоокислювальну стабільність проводили наступним чином: пробу оливи 250±0,1 мл. заливали в прилад для визначення термоокислювальної стабільності, в якому її підтримували при температурі 180°C з перемішуванням мішалкою з частотою обертання 350±3 об/хв. Для виключення впливу металів на окислювальні процеси стакан для проби оливи і мішалка виготовлені зі скла, а частота обертання мішалки оптимізована для досягнення максимальної швидкості окиснення, не допускаючи при цьому турбулентний режим. Час випробування складав 3 год. Після кожної години проби зважували для визначення маси випаровування оливи і відбирали проби для фотометрування. Залишок об'єму досліджуваної оливи піддавали повторному окисненню.

Фотометрування окиснених олив проводили при товщині шару оливи 2мм. Граничні значення коефіцієнта поглинання світлового потоку і випаровуваності трансмісійної оливи характеризується значеннями рівними 0,7 од. і 0,15 од відповідно. Визначені межі отримані на основі трибологічних досліджень олив за ASTM D 2783. За результатами вимірювань будували графічні залежності коефіцієнта поглинання світлового потоку і випаровуваності від часу окиснення. Коефіцієнт термоокислювальної стабільності  $K_{TO}$  визначали за наступною формулою:

$$K_{TOS} = K_{lf} + K_e, \quad (1)$$

де  $K_{lf}$  – коефіцієнт поглинання світлового потоку,  $K_e$  – коефіцієнт випаровуваності оливи:

$$K_e = m_{0i} / m_i, \quad (2)$$

де  $m_{0i}$  – маса на початку  $i$ -го окислення, г,  $m_i$  – маса після  $i$ -го окислення, г.

Визначення кінематичної в'язкості досліджуваної оливи виконували за ДСТУ ГОСТ 33-2003 віскозиметром типу ВПЖТ-2 (ISO 3105-76). Графічні залежності виміру в'язкості при окисненні оливи подані коефіцієнтом відносної в'язкості:

$$K_v = v_{0i} / v_i, \quad (3)$$



де  $v_{0i}$  – кінематична в'язкість на початку  $i$ -го окиснення,  $\text{м}^2/\text{с}$ ,  $v_i$  – кінематична в'язкість після  $i$ -го окиснення,  $\text{м}^2/\text{с}$ .

Достовірність показань приладів і експериментальних даних по визначенню коефіцієнта поглинання світлового потоку і випаровуваності проводили за трьома дослідями відповідних марок оливо при кожному їх діагностуванні. При цьому визначали абсолютну і відносну похибки. Для обробки результатів дослідження використовували ліцензійну програму «Excel 2007», в якій проводили обчислення середнього квадратичного відхилення, коефіцієнта кореляції, коефіцієнта регресії та середньої похибки апроксимації.

Середньо квадратичне відхилення для оцінки величини випадкової помилки результатів діагностування розраховували за формулою:

$$S_{D_j} = \sqrt{\frac{\sum (\overline{D}_j - D_{ji})^2}{n-1}}, \quad (4)$$

де  $n$  – кількість повторень;  $\overline{D}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n D_{ji}$  – діагностичний параметр;  $D_{ji}$  – діагностичний параметр при  $i$ -тому повторенні діагностування. Для характеристики величини випадкової помилки встановлювали довірчий інтервал і величину довірчої ймовірності, які дозволяють оцінити ступінь надійності отриманого результату діагностування. При вимірах обмежувалися довірчою ймовірністю  $\gamma=0,95$ . Тому для кожного виміряного показника при різних температурах випробування довірчий інтервал визначали за формулою:

$$\Delta \tau_{\overline{D}_j} = 2 \cdot \frac{t_\gamma \cdot S_{D_j}}{\sqrt{n}}, \quad (5)$$

де  $t_\gamma$  – критерій Стьюдента, при  $\alpha=1-\gamma$ .

Побудову та оцінку математичної моделі розвитку досліджуваних процесів здійснювали відповідно методом найменших квадратів та за коефіцієнтом детермінації:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (D_{ji} - D_{j.теор})^2}{\sum_{i=1}^n (D_{ji} - \overline{D})^2}, \quad (6)$$

де  $D_{ji}$ ,  $D_{j.теор}$ ,  $\overline{D}$  – фактичне, теоретичне, середнє значення функції процесу, що описується  $j$ -м діагностичним параметром.

Діагностування стану трансмісійної оливи за наведеними методиками має важливе значення для технічного сервісу підприємств, що експлуатують транспортну техніку. Тому виконували їх відбір, щоб забезпечити мінімальну кількість часу на реалізацію.

## 5. Результати отримання закономірностей зміни процесу окислення трансмісійної оливи та їх оцінка відповідно до умов експлуатації

По мірі роботи автомобілів, що знаходились під спостереженням, з їх коробок переключення передач відбирали пробки робочої оливи для дослідження та визначення термоокиснювальної стабільності оливи. Досліджувані оливи містили загущуючі присадки, стійкі проти деструкції. Всі дані технічного стану трансмісійних олив заносили до табл. 1 та табл. 2. Пробіги транспортних машин відраховували від початкового значення на поточний рік. З метою отримання більш точних результатів транспортні машини групували за величиною пробігу, що не перевищували 3 тис. км.

Таблиця 1

Усереднені дані дослідження стану трансмісійної оливи YUKO TO-4 80W-85 (КамАЗ 6520 – 3 шт.) за термоокиснюваною стабільністю під час експлуатації автомобілів за 2018р

Пробіг, тис. км	Коефіцієнт проникності світлового потоку	Коефіцієнт випаровуваності	Коефіцієнт термоокиснювальної стабільності	Коефіцієнт відносної в'язкості
0	0,45	0,141	0,591	1,6
12	0,68	0,145	0,825	1,9
24	0,72	0,147	0,867	2,1
36	0,79	0,151	0,941	2,4
48	0,81	0,158	0,968	2,52

Сформовані експериментальні дані таблиці 1 відображені графічно (рис. 1, рис. 2) та отримано їх математичні моделі при коефіцієнті детермінації, який був не меншим 0,95.

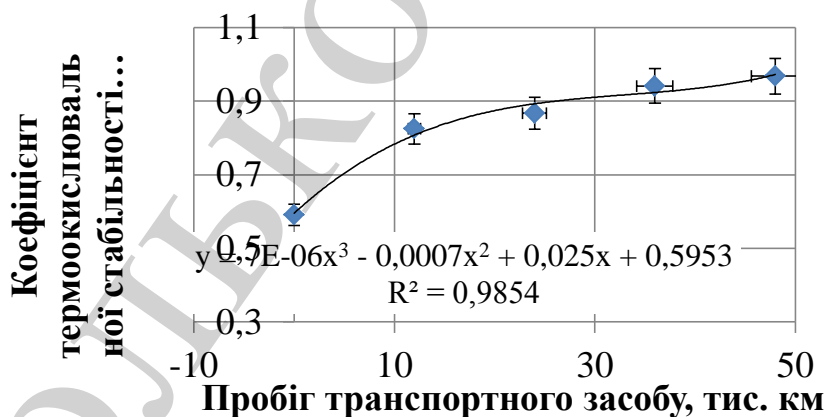


Рис. 1. Зміна коефіцієнта термоокислювальної стабільності трансмісійної оливи YUKO TO-4 80W85 в залежності від пробігу транспортних засобів

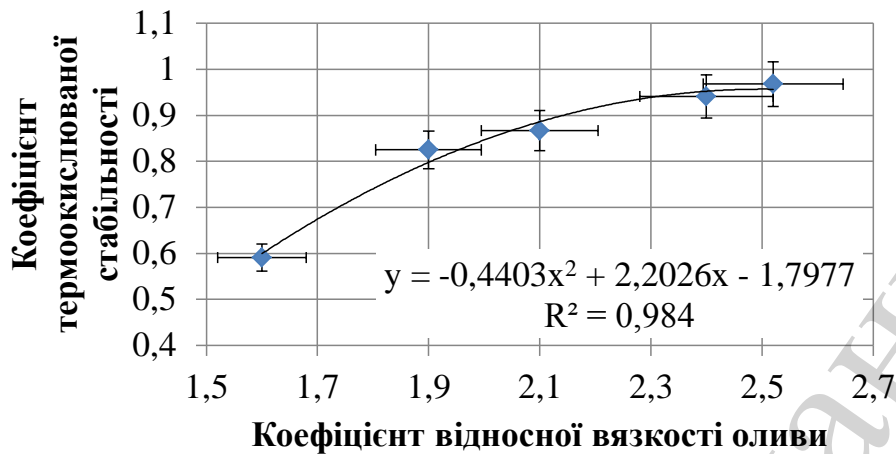


Рис. 2. Зміна коефіцієнта термоокислювальної стабільності трансмісійної оливи YUKO TO-4 80W85 в залежності від коефіцієнта відносної в'язкості оливи

Таблиця 2

Усереднені дані дослідження стану трансмісійної оливи Tedex Gear GL-4 80W90 (MAN TGA 6×4 – 3 шт.) за термоокислювальною стабільністю під час експлуатації автомобілів за 2018р

Пробіг, тис. км	Коефіцієнт проникності світлового потоку	Коефіцієнт випаровуваності	Коефіцієнт термоокислювальної стабільності	Коефіцієнт відносної в'язкості
0	0,55	0,121	0,671	1,7
12	0,57	0,127	0,697	1,85
24	0,66	0,129	0,789	2,04
36	0,69	0,131	0,821	2,1
48	0,71	0,135	0,845	2,15

Сформовані експериментальні дані табл. 2 відображені графічно (рис. 3, рис. 4) та отримано математичні моделі з зазначеними границями та оцінками. Коефіцієнт детермінації більший або рівний 0,95.

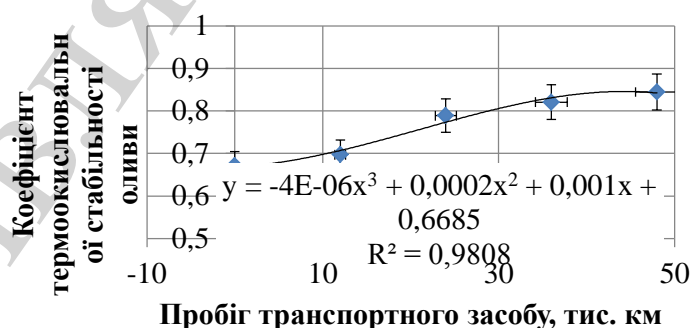


Рис. 3. Зміна коефіцієнта термоокислювальної стабільності трансмісійної оливи Tedex Gear GL-4 80W90 в залежності від пробігу транспортного засобу

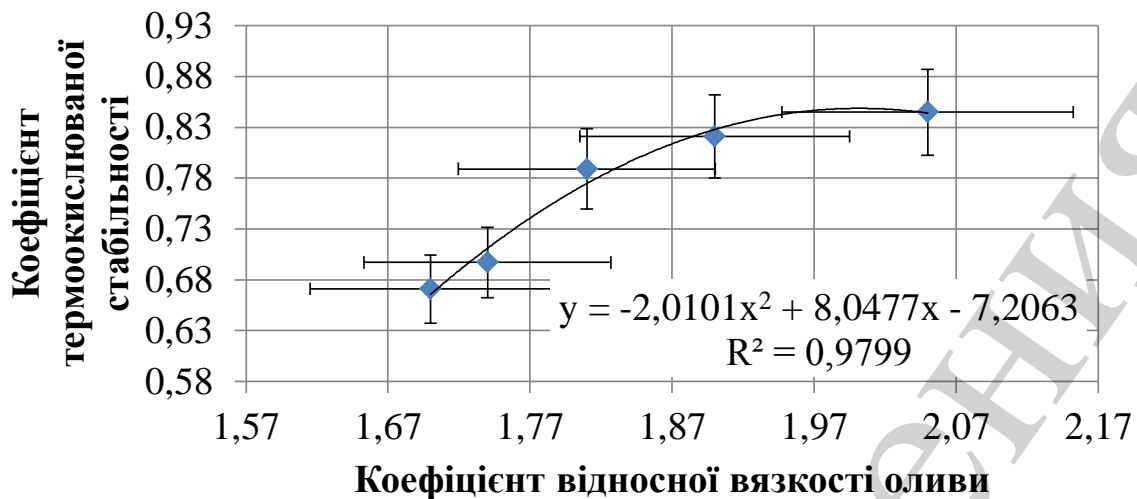


Рис. 4. Зміна коефіцієнта термоокислювальної стабільності трансмісійної оливи Tedex Gear GL-4 80W90 в залежності від коефіцієнта відносної в'язкості оливи

Зміна термоокислювальної стійкості трансмісійної оливи також відображає зміну відносної в'язкості оливи, що додатково враховує умови спрацювання присадок, їх додаткових елементів та утворення кластерів відпрацьованих включень оливи. Контроль даних включень та подальша працездатність оливи визначається стійкістю оливи відносно температурного фактору.

## 6. Обговорення результатів визначення та діагностування стану трансмісійної оливи під час експлуатації

Процес окиснення трансмісійної оливи стимулює зміну оптичних властивостей, летючості і в'язкості. За таких умов слід вважати, що в'язкість змінюється в результаті спрацювання комплекту присадок та утворення кластерів продуктів окиснення, тому працездатність оливи доцільно оцінювати коефіцієнтом термоокиснювальної стабільності, що визначається за виразом (1). Цей коефіцієнт характеризує кількість надлишкової теплової енергії, поглиненої продуктами окиснення і випаровування кислотних включень в досліджуваних оливах.

Аналізуючи результати дослідження термоокиснювальної стабільності трансмісійної оливи YUKO TO-4 80W-85 на автомобілях КамАЗ 6520 в кількості 3 шт., заміна оливи через кожні 48 тис. км не забезпечує експлуатаційні умови. Про це свідчить рис. 1, згідно якого математична модель зміни термоокиснювальної стабільності на пробігу 14 тис. км. транспортних засобів виходить за допустимі межі. Також на інтервалі 14-48 тис. км рівень цього діагностичного параметру оливи перевищує значення 0,85 од. Даний характер розвитку процесу відображає невідповідність оливи досліджуваної марки до режимів експлуатації транспортних машин КамАЗ 6520.

Збільшення показника в'язкості трансмісійної оливи забезпечує початкові умови мащення зубів коробок переключення передач, але не може забезпечити належний режим тертя під час експлуатації. В таких умовах виникає утруднення під час потрапляння необхідної порції оливи, що сприяє перегріву деталей ко-

робки переключення передач і тим самим збільшує інтенсивність процесу окиснення оливи. На рис. 2 відображено зміни відносної в'язкості трансмісійної оливи YUKO TO-4 80W-85. Зміна цієї величини більшої за 1,96 характеризує деструкцію присадок та утворення кластерів продуктів зношування. Перетворення на такому короткому інтервалі пробігу відбулися за рахунок не відповідності використовуваної марки оливи до режимів експлуатації транспортних засобів КамАЗ 6520. Тому її використання необхідно переглянути для транспортних засобів на підприємстві АТП 2004, м. Кропивницький (Україна) з урахуванням результатів дослідження відповідних марок автомобілів.

Аналізуючи результати дослідження термоокислювальної стабільності трансмісійної оливи Tedex Gear GL-4 80W90 на автомобілях MAN TGA 6×4 в кількості 3 шт., спостерігається забезпечення її до умов експлуатації. Цей висновок зроблено на основі відсутності значного приросту математичної моделі на рис. 3., а також недосягнення рівня термоокислювальної стабільності оливи 0,85 од. під час досліду експлуатаційного періоду. Аналізуючи характер залежності зміни коефіцієнту термоокислювальної стабільності оливи від приросту її в'язкості спостерігається відповідність навантажувальним режимам. Також даний характер розвитку математичної моделі рис. 4 відображає поступове спрацювання складових компонентів оливи під час експлуатації. Дані режими є раціональними і показують відповідність оливи до технічної експлуатації транспортних машин.

Результати експериментальних досліджень коефіцієнту термоокислювальної стабільності свідчать, що при встановленні стану працездатності трансмісійної оливи необхідно враховувати результати досліджень коефіцієнтів проникненості світлового потоку, випаровуваності і відносної в'язкості. Зазначене було покладено в основу розробки методики встановлення моменту закінчення працездатності оливи за отриманими результатами дослідженнями.

Обмеження при дослідженні коефіцієнту пропускання світлового потоку встановлюються лише по процентному вмісту бензолу в досліджуваній пробі робочої оливи, що не повинно перевищувати 10%. Тому що відбувається значне розсіювання повторювальних вихідних експериментальних результатів. Процес дослідження термоокислювальної стабільності бажано проводити при температурному режимі не більше 180–182°C з ламінарним перемішування робочої оливи. В свою чергу, це гарантує поступове окиснення оливи по всьому її об'єму в мірній колбі без локальних перегрівів, які додатково усунуть утворення значних вуглецевих кластери в ній.

Дослідження термоокислювальної стабільності трансмісійної оливи дає змогу визначити чи правильно підібрана марка оливи. Подальші дослідження даного діагностичного параметру дасть змогу вирішити проблему підбору комплексу присадок до оливи, а також можливості їх додавання під час експлуатації. Подальше дослідження технічного стану трансмісійної оливи за термоокислювальною стабільністю дасть змогу встановлювати пробіги транспортних засобів, на яких потрібно додавати в робочу оливу присадки для гарантованого терміну її експлуатації.

## 7. Висновки

1. Експериментальними дослідженнями встановлено зміну термоокислювальної стабільності з пробігом автомобілів, з використанням результатів досліджень коефіцієнтів проникненості світлового потоку, випаровуваності та відносної в'язкості. Отримано відповідні регресійні рівняння зміни коефіцієнту термоокислювальної стабільності від пробігу транспортного засобу та коефіцієнту відносної в'язкості трансмісійних олив YUKO TO-4 80W-85 та Tedex Gear GL-4 80W90 під час експлуатації транспортних засобів марок КамАЗ 6520, MAN TGA 6×4.

2. Виявлено, що трансмісійна олива YUKO TO-4 80W-85 на автомобілях КамАЗ 6520 не забезпечує свої функціональні можливості на 14–48 тис. км. пробігу. Про це свідчить набуття значень функції математичної моделі, що описує зміну термоокислювальної стабільності оливи від відносної в'язкості на досліджуваних пробігах автомобілів 0,968 од., що є більшим за допустимий рівень 0,85 од. Розвиток зміни коефіцієнта термоокислювальної стабільності від відносної в'язкості у певних зонах за допустимі межі характеризує деструкційну зміну присадок та утворення кластерів продуктів зношування, що також характеризує невідповідність даної оливи умовам експлуатації.

3. Трансмісійна олива Tedex Gear GL-4 80W90, що експлуатується на автомобілях MAN TGA 6×4, за характеристикою її термоокислювальної стабільності відповідає умовам експлуатації. Про це свідчить набуття максимального значення функції математичної моделі, що описує зміну термоокислювальної стабільності оливи від відносної в'язкості на досліджуваних пробігах автомобілів 0,8450 од., що є меншим за допустимий рівень. Розвиток зміни термоокислювальної стабільності від відносної в'язкості відображає поступове спрацювання присадок в робочій оливі.

## Література

1. Substantiation of diagnostic parameters for determining the technical condition of transmission assemblies in trucks / Aulin V., Hrinkiv A., Dykha A., Chernovol M., Lyashuk O., Lysenko S. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. Vol. 2, Issue 1 (92). P. 4–13. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.125349>
2. Lin J.-M., Wang W., Dai Y.-H. On-Line Monitoring of Particle in Oil Based on Electromagnetic NDT Technique // Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics. 2015. Vol. 40. P. 329–336. doi: <http://doi.org/10.3233/978-1-61499-509-8-329>
3. Development of a method and an apparatus for tribotechnical tests of materials under loose abrasive friction / Lutsak D., Prysyzhnyuk P., Burda M., Aulin V. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2016. Vol. 5, Issue 7 (83). P. 19–26. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.79913>
4. Yan S.-F., Ma B., Zheng C.-S. Remaining useful life prediction for power-shift steering transmission based on fusion of multiple oil spectra // Advances in Mechanical Engineering. 2018. Vol. 10, Issue 6. P. 168781401878420. doi: <https://doi.org/10.1177/1687814018784201>

5. Sowing machines and systems based on the elements of fluidics / Aulin V., Chernovol M., Pankov A., Zamota T., Panayotov K. // INMATEH – Agricultural Engineering. 2017. Vol. 53, Issue 3. P. 21–28. URL: <http://dspace.kntu.kr.ua/jspui/bitstream/123456789/7278/1/53-03%20Aulin%20.pdf>

6. On-line detection of incipient trend changes in lubricant parameters / Salgueiro J. M., Peršin G., Hrovatin J., Juricic Đ., Vižintin J. // Industrial Lubrication and Tribology. 2015. Vol. 67, Issue 6. P. 509–519. doi: <https://doi.org/10.1108/ilt-09-2013-0097>

7. Van Rensselaar J. Trends in industrial gear oils // Tribology and Lubrication Technology. 2013. Vol. 69, Issue 2. P. 26–33. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84873974634&partnerID=40&md5=9e4c6b38cc445f867bc21d4c67302f50>

8. Interpretation of the properties of refined rice bran oil as bio lubricant / Amudhan A., Karthicka N., Manonmanis K., Parimalamurugaveni S. // International Journal of Applied Engineering Research. 2015. Vol. 10, Issue 55. P. 3952–3955. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84942418557&partnerID=40&md5=c3484681ecdc1ca4f2f1652bcf6dd976>

9. Sharma B. K., Perez J. M., Erhan S. Z. Soybean Oil-Based Lubricants: A Search for Synergistic Antioxidants // Energy & Fuels. 2007. Vol. 21, Issue 4. P. 2408–2414. doi: <https://doi.org/10.1021/ef0605854>

10. The mathematical prediction model for the oxidative stability of vegetable oils by the main fatty acids composition and thermogravimetric analysis / Li J., Liu J., Sun X., Liu Y. // LWT. 2018. Vol. 96. P. 51–57. doi: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.05.003>

11. Filho A. A. P., Luna F. M. T., Cavalcante C. L. Oxidative stability of mineral naphthenic insulating oils: Optimization of commercial antioxidants and metal passivators // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2019. Vol. 26, Issue 1. P. 240–246. doi: <http://doi.org/10.1109/TDEI.2018.007513>

12. The thermal stability of rapeseed oil as a base stock for environmentally friendly lubricants / Kreivaitis R., Padgurskas J., Gumbytė M., Makarevičienė V. // Mechanics. 2014. Vol. 20, Issue 3. doi: <https://doi.org/10.5755/j01.mech.20.3.5278>