

Є. І. КАЛІНІН, О. Ю. РЕБРОВ

МЕТОД МОТОРНОЇ ОЦІНКИ ЗАХИСНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МОТОРНИХ ОЛИВ ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ

У роботі представлено результати розробки та експериментального обґрунтування методу прискореної оцінки захисних (антикорозійних) властивостей моторних олив в умовах, максимально наближених до реальної експлуатації двигунів внутрішнього згоряння. Експериментально встановлено, що при температурах охолоджувальної води та оливи нижче 40 °С на поверхні гільзи циліндра створюються умови для інтенсивної корозії, що супроводжується різким зростанням вмісту водного конденсату в оливі та підвищенням ступеня конденсації картерних газів. Обґрунтовано доцільність використання комбінованого режиму випробувань, який включає «холодний» етап роботи двигуна, зупинку з примусовим прокачуванням охолоджувальної рідини підвищеної температури та подальшу роботу на «гарячому» режимі. Показано, що такий режим забезпечує інтенсифікацію корозійних процесів і водночас дозволяє отримати відтворювані результати за відносно короткий час. Запропоновано критерії оцінки захисних властивостей моторних олив за індукційним періодом корозії, кількістю деталей з корозійними осередками, площею та характером корозійних уражень контрольної пластини та елементів газорозподільного механізму. Встановлено кореляційний зв'язок між величиною зношування гільзи циліндра та показниками корозійного ураження контрольних елементів, що дозволяє застосовувати спрощену експрес-оцінку без тривалих ресурсних випробувань. У результаті оптимізації тривалості циклів визначено раціональний тригодинний режим випробувань, який забезпечує чітку фіксацію початку індукційного періоду корозії та підвищує чутливість методу до відмінностей у захисних властивостях різних олив. Проведені порівняльні випробування показали, що введення комбінованих інгібіторів корозії істотно підвищує антикорозійну ефективність моторних олив, тоді як найвищі захисні властивості демонструють синтетичні робочо-консерваційні оливи з інгібіторами комплексної дії. Запропонований метод може бути використаний для наукових досліджень, розробки та порівняльної оцінки моторних олив за рівнем їх захисних властивостей.

Ключові слова: моторна олива, електрохімічна корозія, індукційний період корозії, конденсація картерних газів, захисні властивості, інгібітори корозії, гільза циліндра, газорозподільний механізм, випробувальний режим.

Y. KALININ, O. REBROV

METHOD FOR MOTOR EVALUATION OF THE PROTECTIVE PROPERTIES OF INTERNAL COMBUSTION ENGINE OILS

The paper presents the results of the development and experimental substantiation of a method for accelerated assessment of the protective (anti-corrosion) properties of motor oils in conditions as close as possible to the real operation of internal combustion engines. It is shown that the determining condition for the development of electrochemical corrosion of parts of the cylinder-piston group is the presence of an electrolyte film on their surface, the formation of which is due to the condensation of water vapor and crankcase gas components at low-temperature engine operation modes, as well as during its shutdown. It was experimentally established that at temperatures of cooling water and oil below 40 °C, conditions for intensive corrosion are created on the surface of the cylinder liner, which is accompanied by a sharp increase in the content of water condensate in the oil and an increase in the degree of condensation of crankcase gases. The feasibility of using a combined test mode is substantiated, which includes a “cold” stage of engine operation, shutdown with forced pumping of a coolant of elevated temperature and further operation in a “hot” mode. It is shown that such a regime provides intensification of corrosion processes and at the same time allows to obtain reproducible results in a relatively short time. Criteria for assessing the protective properties of motor oils are proposed based on the corrosion induction period, the number of parts with corrosion foci, the area and nature of corrosion damage to the control plate and elements of the gas distribution mechanism. A correlation between the amount of cylinder liner wear and the indicators of corrosion damage to control elements is established, which allows for the use of simplified express assessment without lengthy resource tests. As a result of optimizing the duration of the cycles, a rational three-hour test regime was determined, which provides a clear fixation of the beginning of the corrosion induction period and increases the sensitivity of the method to differences in the protective properties of different oils. The comparative tests conducted showed that the introduction of combined corrosion inhibitors significantly increases the anti-corrosion efficiency of motor oils, while the highest protective properties are demonstrated by synthetic working and conservation oils with inhibitors of complex action. The proposed method can be used for scientific research, development and comparative assessment of motor oils in terms of their protective properties.

Key words: motor oil, electrochemical corrosion, corrosion induction period, crankcase gas condensation, protective properties, corrosion inhibitors, cylinder liner, gas distribution mechanism, test mode.

Вступ.

До ефективних засобів боротьби з корозією в двигунах внутрішнього згоряння в періоди зберігання та експлуатації автомобілів відносяться моторні оливи, що володіють підвищеними захисними властивостями, тобто здатні захистити деталі двигуна від електрохімічної корозії. Створення та промисловий випуск таких оливо потребують наявності надійних методів оцінки їх захисних властивостей.

При цьому, для оцінки захисних властивостей оливо, на сьогоднішній день, використовують лабораторні методи. Однак при цьому не можна повністю відтворити всі умови роботи двигуна і всі фактори, що впливають на корозію його деталей в експлуатації. Тому остаточна оцінка захисних властивостей моторних оливо може вирішуватися лише за умов, реально наближених до експлуатаційних.

Аналіз останніх досягнень та публікацій.

Метод моторної оцінки захисних властивостей моторних оливо двигунів внутрішнього згоряння є одним із найбільш репрезентативних підходів до визначення їх трибологічної ефективності в умовах, максимально наближених до реальної експлуатації. На відміну від лабораторних стендових або модельних трибологічних випробувань, моторні методи дозволяють комплексно враховувати вплив термомеханічних навантажень, продуктів згоряння палива, процесів старіння та деградації оливи на зношування пар тертя та стабільність захисних плівок [1, 2]. В таких дослідженнях оцінка захисних властивостей ґрунтується на аналізі інтенсивності зношування критичних елементів двигуна, зміні параметрів тертя, втраті потужності та зростанні витрати палива.

В сучасних дослідженнях моторна оцінка захисних властивостей оливо поєднується з аналізом їх фізико-хімічних характеристик і складу пакета присадок. Показано, що ефективність протизношувальних і протизадирних присадок суттєво впливає на формування граничних мастильних плівок, здатних знижувати контактні напруження в умовах змішаного та граничного тертя [3, 4]. Моторні випробування дозволяють виявити критичні режими, за яких відбувається руйнування захисного шару, а також простежити кореляцію між показниками зношування та зміною в'язкісно-температурних властивостей оливи в процесі експлуатації.

Так, в роботі [4], для оцінки захисних властивостей моторних оливо, використана одноциліндрова карбюраторна установка, що призначена для оцінки схильності оливо до утворення високотемпературних та низькотемпературних відкладень. Установка додатково оснащена електропідігрівачем води у теплообміннику. Двигун установки має систему вентиляції картера, коли всі гази надходять під кришку головки циліндра, омиваючи деталі механізму газорозподілу.

Подальший розвиток методу моторної оцінки захисних властивостей моторних оливо пов'язаний з упровадженням інструментальних методів моніторингу стану двигуна та елементів тертя. Зокрема, застосування аналізу продуктів зношування в оливі, віброакустичних методів і цифрових моделей тертя дозволяє підвищити інформативність моторних випробувань та забезпечити предиктивну оцінку ефективності мастильних матеріалів [5, 6]. Таким чином, моторні методи залишаються ключовим інструментом комплексної оцінки захисних властивостей моторних оливо і формують наукову основу для їх оптимізації відповідно до вимог сучасних високонавантажених двигунів внутрішнього згоряння.

Мета та постановка задачі дослідження.

Метою даної роботи є розробка та експериментальне обґрунтування режиму моторних випробувань для прискореної оцінки захисних (антикорозійних) властивостей моторних оливо в умовах, максимально наближених до реальної експлуатації, з урахуванням утворення електролітної плівки на поверхні гільзи циліндра внаслідок конденсації картерних газів на низькотемпературних режимах та під час зупинки двигуна з примусовим прокачуванням охолоджувальної рідини.

Для досягнення поставленої мети вирішувались завдання визначення вихідних температурних умов, за яких на поверхні гільзи циліндра формується електролітна плівка і створюються передумови інтенсивної електрохімічної корозії; експериментального встановлення залежностей між робочими температурами двигуна, ступенем конденсації картерних газів і накопиченням водного конденсату в оливі; обґрунтування доцільності застосування «холодного» етапу випробувань та етапу зупинки двигуна з прокачуванням води підвищеної температури для інтенсифікації корозійного процесу; визначення критеріїв оцінювання захисних властивостей оливи за індукційним періодом корозії, кількістю уражених деталей і площею корозійного ураження контрольної пластини та елементів газорозподільного механізму; оптимізація тривалості циклу випробувань і формування раціонального тригодинного режиму з послідовністю «холодний режим – прокачування гарячої води – гарячий режим – охолодження»; регламентація мінімальної подачі оливи до деталей газорозподільного механізму для підвищення відтворюваності результатів; порівняльне випробування базових та інгібованих оливи і аналіз впливу інгібіторів корозії на підвищення захисних властивостей.

Основний матеріал та результати дослідження.

Оскільки умовою протікання електрохімічної корозії є наявність на деталях плівки електроліту, а можливість конденсації електроліту на поверхні гільзи циліндра визначається різницею температур (температурами насичення водяної пари та самої гільзи, були визначені вихідні значення цих величин за різних робочих температур двигуна.

Встановлено, що, при температурах води та оливи у двигуні нижче 40°C , на поверхні гільзи циліндра установки створюються умови для протікання інтенсивної корозії. При цьому різко зростає накопичення водного конденсату в оливі, вміст якого через 5 годин роботи двигуна з температурою води 20°C досягає 6%. Це пояснюється збільшенням ступеня конденсації картерних газів у двигуні, яка, за температури води 20°C , дорівнює 60% – рис. 1, де $G_{\text{кх}}$ – кількість конденсату з картерних газів при поточних температурах двигуна, а $G_{\text{кmax}}$ – кількість конденсату з картерних газів при температурі їх конденсації в 0°C . Тому, за основу режиму випробувань захисних властивостей оливи було прийнято «холодний» етап випробувань з температурою води та оливи відповідно 25°C і 35°C , при якому відбувається інтенсивна корозія деталей двигуна. Найбільш точна оцінка захисних властивостей моторних оливи може бути отримана шляхом оцінки величини зношування гільзи циліндра. Однак це вимагає досить тривалих випробувань і має досить трудомісткий характер.

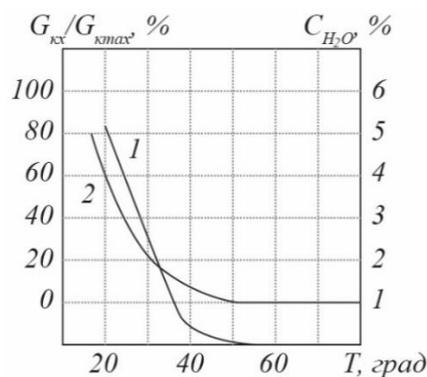


Рис. 1 – Залежність вмісту води C_{H_2O} в оливі від робочої температури двигуна (крива 1) та ступеня конденсації картерних газів в двигуні $G_{\text{кх}}/G_{\text{кmax}}$ від його робочих температур (за водою та оливою) (крива 2)

В той же час була експериментально встановлена кореляційна залежність між величиною зношування гільзи циліндра (виміряною за допомогою поверхневої активації) та ступенем

ураження корозією контрольної пластини та деталей механізму газорозподілу (рис. 2). Тому було прийнято доцільним оцінку захисних властивостей оливи проводити за часом до початку появи корозії (індукційний період корозії) та ступенем ураження корозією контрольної пластини, виготовленої з матеріалу гільзи циліндра, встановленої в кришці головки циліндра, а також деталей механізму газорозподілу. Інтенсивність корозії металу, змоченого електролітом, із підвищенням температури, змінюється за складною залежністю. Швидкість корозії зростає зі збільшенням температури до 60...65°C, а потім дещо знижується і при 100°C дорівнює швидкості корозії при кімнатній температурі.

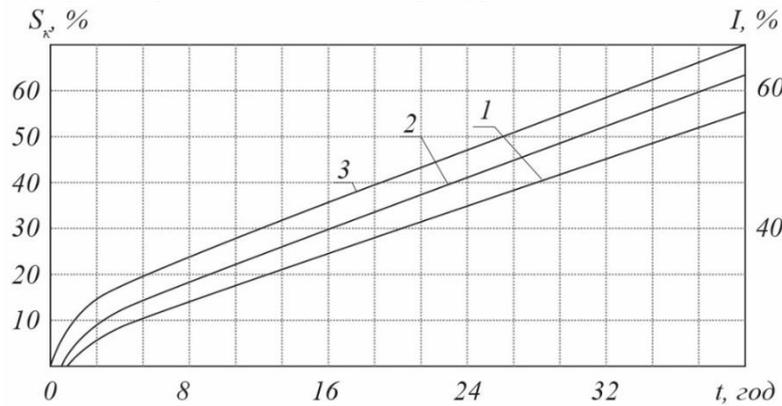


Рис. 2 – Залежність площі ураження корозією S_k контрольної пластини (крива 1), стійки осі коромисла (крива 2) та відносного зношення гільзи циліндрів (крива 3) від тривалості дослідження t на спеціальному режимі

Експеримент, проведений на оливі SAE 20, показав, що кількість деталей з осередками корозії збільшується з підвищенням температури води, що прокачується в системі охолодження зупиненого двигуна. Це свідчить про доцільність включення в режим випробування (для інтенсифікації процесу корозії) етапу, що передбачає зупинку двигуна з примусовим прокачуванням води, що має температуру 60°C. На установці проведений збір і аналіз конденсату картерних газів, який може осаджуватися на деталях двигуна при його роботі на низькотемпературному режимі і під час зупинки з прокачуванням гарячої води (випробування проводилися на бензині марки AI-98). З наведених нижче даних (табл. 1) видно, що конденсат є переважно підкисленим розчином, що сприяє збільшенню швидкості корозії.

В процесі відпрацювання режиму було встановлено, що проводити огляд двигуна після «холодного» етапу випробувань і етапу прокачування води важко, оскільки деталі вкриті водомасляною емульсією. У зв'язку з цим, в якості заключного етапу, здійснювалася робота двигуна на «гарячому» режимі з температурою води та оливи відповідно 90 і 80°C. При цьому відбувалося випаровування конденсату, деталі ставали доступними для огляду, а випробування можна було перервати на значний час, оскільки корозія деталей, покритих плівкою оливи без конденсату, практично не прогресувала.

Таблиця 1 – Характеристики конденсату внутрішнього простору двигуна внутрішнього згоряння

Характеристика	Відсоток
Вміст води, %	85...95
Вміст палива, %	2...8
Вміст оливи, %	1...7
Вміст механічних домішок, %	0,01...0,02
Кислотність, мг КОН/г	1,3...3,4

На першому етапі відпрацювання методики випробувань було прийнято восьмигодинний режим, що поєднує тривалу роботу двигуна при зниженій температурі охолоджувальної води та оливи (4 години), зупинку з прокачуванням гарячої води через систему охолодження

двигуна (3 години) з подальшою роботою при підвищеній температурі (1 година). З наведених у табл. 2 даних видно, що цей режим виявився жорстким, що утруднює диференціацію та оцінку оливо за захисними властивостями (значення індукційного періоду корозії для всіх оливо було практично однаковим).

Таблиця 2 – Характеристики оливо за процесом кородування

Олива	Індукційний період корозії, год	Число деталей, що уражені корозією, шт	Площа ураження корозією контрольної пластини, %
SAE 20 (марка №1)	8	6	54
SAE 20 (марка №2)	8	5	42
SAE 20 (марка №1)+ Hercules Corrosion Inhibitor 35297	8	5	19
Industrial Rust Preventive Oil	8	6	45
SAE 30 (марка №4)	16	3	8,5

У зв'язку з цим було проведено дослідження щодо визначення оптимальної тривалості циклів. При скороченні тривалості випробувань від 8 до 3 годин лінійно змінюється кількість деталей, уражених корозією. Тому, в якості оптимального варіанту було визнано тригодинний цикл випробувань, що дозволяє чітко визначати початок індукційного періоду корозії. Тригодинний цикл випробувань включає роботу двигуна на холодному режимі протягом 1 години, прокачування гарячої води через систему охолодження двигуна 1 годину, роботу двигуна на гарячому режимі 50 хвилин і подальше охолодження – 10 хвилин. Режим випробувань наведено у табл. 3.

Таблиця 3 – Основні характеристики режимів випробування

Найменування параметрів	Холодний режим	Зупинка двигуна	Гарячий режим	Зупинка двигуна
Тривалість режиму, год	1	1	50 хв	10 хв
Потужність двигуна, Вт	6987±150		11408±150	
Частота обертання колінчастого валу, хв ⁻¹	1900±2,5		3000±2,5	
Годинна витрата палива, кг/год	2,7±0,1		4,5±0,1	
Коефіцієнт надлишку повітря	1,0±0,03		1,0±0,03	
Кут випередження запалення, град	31±1		40±1	
Тиск оливи в масляній магістралі, МПа	1,94±0,1		1,94±0,1	
Протитиск на випуску, МПа, не більше	980		980	
Температура охолоджувальної води на виході з головки двигуна, °С	25±2	60±2	90±5	15...20
Температура оливи в масляному картері, °С	35±2		80±5	
Прорив картерних газів, л/хв	17...20		17...20	

Надмірне надходження оливи до деталей значно знижує швидкість корозії, а також сприяє змиванню продуктів корозії, особливо на гарячому режимі. У зв'язку з цим для отримання стабільних результатів при випробуванні різних оливо на установці були проведені заходи, що дозволили регламентувати мінімальну кількість оливи, що надходить до деталей газорозподільного механізму. Для зменшення попадання оливи на деталі, на головці циліндра встановлювалася масловідбивна сітка. Тиск у системі мащення було зменшено з 2,95 до 1,95

МПа. Подача оливи до деталей була також зменшена за рахунок зміни діаметра отвору дроселя в стійці осі коромисел з 2,2 до 0,3 мм.

Оцінка захисних властивостей моторних олив проводилася після закінчення 30-годинних випробувань (10 циклів) шляхом порівняння результатів, отриманих для дослідного та контрольних олив. Вибір тривалості випробувань (30 годин) був зроблений на підставі того, що у випробуваних моторних оливах 20 зразків індукційний період корозії не перевищував 30 годин, а після 30 годин випробувань високоякісних робочо-консерваційних олив відзначали корозійні ураження деталей. Таким чином, прийнятий режим має певний запас часу і одночасно дозволяє відносно швидко проводити випробування та об'єктивно оцінювати захисні властивості оливи.

Наявність корозії після випробувань визначалося на шести деталях – двох стійках осі коромисел клапанів, двох коромислах клапанів, маслоскидаючої втулки та контрольної пластини (рис. 3). Перед початком випробувань ці деталі зачищали та промивали в бензині. В якості оціночних показників служили індукційний період корозії, кількість деталей з корозійними осередками, площа ураження деталей корозією та характер корозії.

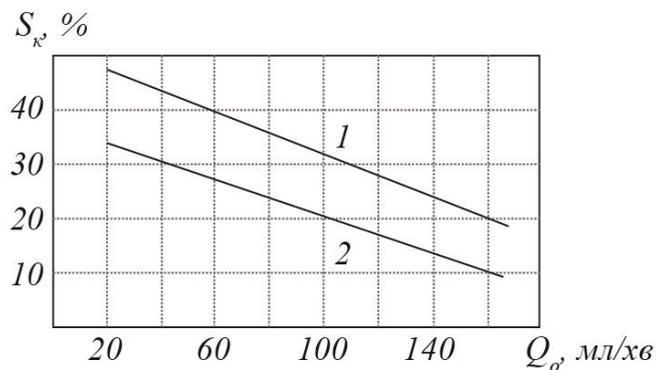


Рис. 3 – Залежність площі корозійних уражень на контрольній пластині (пряма 1) та стійках осі коромисел клапанів (пряма 2) від кількості оливи Q_o , що потрапляє через калібрований отвір дроселя

Значення індукційного періоду корозії визначалося часом (в годинах) випробування до появи корозійних вогнищ на деталях, що оцінюються, площею не менше 1 см^2 . Число деталей з корозійними осередками визначалося візуально після закінчення випробувань.

Площа ураження деталей корозією оцінювалася в балах і визначалася для контрольної пластини та стійок осі коромисел клапанів за допомогою спеціальних трафаретів. Для деталей, що мають складну геометрію (коромисла клапанів, маслоскидаюча втулка), площа ураження корозією визначалася за допомогою спеціально розроблених таблиць.

Оцінку характеру корозії деталей K_y у балах проводили за такою формулою:

$$K_y = \sum K_{yi} C_k \quad (1)$$

де K_{yi} – число деталей з корозійними осередками одного характеру; C_k – коефіцієнт характеру корозійних уражень.

У разі відсутності корозійних уражень на деталях, що оцінюються, за даний час випробувань оціночні показники мають 0 балів. Даний комплекс показників дозволяє диференціювати оливи за їх рівнем захисних властивостей.

На розробленому режимі було випробувано низку зразків моторних олив. Як видно з отриманих даних, найбільш низькими захисними властивостями володіє олія SAE 20 (марка №1). Введення в дану оливу комбінованого інгібітора Hercules Corrosion Inhibitor 35297, що володіє анодною та екрануючою дією, покращує захисні властивості оливи більш ніж у 2 рази. Найкращими захисними властивостями володіє синтетична моторна олія SAE 30 (марка №4),

в яку введений інгібітор корозії, що поєднує анодну, катодну та екрануючі дії.

Принцип дії інгібітору заснований на витісненні електроліту з поверхні металу, розмиканні ланцюга електрохімічної корозії та заміні полярної фази електроліту на поверхні металу хемосорбційним шаром органічних речовин [4], тобто плівка робочо-консерваційної оливи в порівнянні з робочими оливами має значно більші адсорбційно-хемосорбційні властивості, що визначає високу захисну здатність.

Висновки.

В роботі розроблений метод, що передбачає проведення випробування на одноциліндровій карбюраторній установці, та дозволяє у відносно короткі терміни, в умовах максимально наближених до реальних, проводити оцінку захисних властивостей моторних олив. Використання цього методу сприятиме створенню моторних олив, що володіють високими захисними властивостями.

Список літератури:

1. Spikes H. Low- and zero-sulphated ash, phosphorus and sulphur anti-wear additives for engine oils / H. Spikes // Tribology International. 2020. Vol. 151. Article No. 106492. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106492>
2. Mosey N.J., Müser M.H., Woo T.K. Molecular mechanisms of boundary lubrication by organophosphate antiwear additives / N.J. Mosey, M.H. Müser, T.K. Woo // Tribology Letters. 2020. Vol. 68, No. 3. Article No. 79. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11249-020-01315-3>
3. Zhang J., Meng Y., Luo J. Tribochemical reactions of ZDDP and novel ashless antiwear additives under boundary lubrication / J. Zhang, Y. Meng, J. Luo // Wear. 2021. Vol. 476–477. Article No. 203702. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203702>
4. Kajdas C., Hiratsuka K. Mechanisms of antiwear film formation and failure in modern engine oils / C. Kajdas, K. Hiratsuka // Tribology Online. 2021. Vol. 16, No. 5. P. 420–432. DOI: <https://doi.org/10.2474/trol.16.420>
5. Korcek S., Barnes A.M., Fitch J. Advances in engine oil wear protection and tribofilm durability under severe operating conditions / S. Korcek, A.M. Barnes, J. Fitch // SAE International Journal of Fuels and Lubricants. 2022. Vol. 15, No. 2. P. 231–245. DOI: <https://doi.org/10.4271/04-15-02-0015>
6. Jantunen E., Zurutuza U., Varga P. Oil condition monitoring and wear diagnostics using multi-parameter data fusion / E. Jantunen, U. Zurutuza, P. Varga // Mechanical Systems and Signal Processing. 2023. Vol. 188. Article No. 110012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2022.110012>
7. Onodera T., Kawasaki K., Kubo M. Reactive molecular dynamics study of ZDDP tribofilm formation under boundary lubrication / T. Onodera, K. Kawasaki, M. Kubo // Tribology International. 2020. Vol. 150. Article No. 106354. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106354>
8. Dearn K.D., Chen X., Lewis R. The role of lubricant additives in boundary lubrication of engine components / K.D. Dearn, X. Chen, R. Lewis // Wear. 2020. Vol. 452–453. Article No. 203275. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2020.203275>
9. Sharma V., Singh R., Kumar P. Tribological performance of ashless antiwear additives in engine oils under boundary lubrication / V. Sharma, R. Singh, P. Kumar // Tribology Letters. 2021. Vol. 69, No. 2. Article No. 45. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11249-021-01435-2>
10. Liu Y., Guo F., Wang L. Synergistic effects of ZDDP and organic friction modifiers on tribofilm formation / Y. Liu, F. Guo, L. Wang // Tribology International. 2021. Vol. 158. Article No. 106939. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.106939>
11. Nevshupa R.A., Grützmacher P.G., Morales-Espejel G.E. Evolution of boundary lubrication regimes in engine oils with antiwear additives / R.A. Nevshupa, P.G. Grützmacher, G.E. Morales-Espejel // Lubricants. 2022. Vol. 10, No. 4. Article No. 76. DOI: <https://doi.org/10.3390/lubricants10040076>
12. Ratoi M., Zekonyte J., Spikes H. Influence of additive chemistry on tribofilm durability in engine oils / M. Ratoi, J. Zekonyte, H. Spikes // Tribology International. 2022. Vol. 168. Article No. 107422. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2022.107422>
13. Sui X., Zhang C., Luo J. Mechanisms of antiwear performance of phosphate esters as ZDDP alternatives / X. Sui, C. Zhang, J. Luo // Wear. 2022. Vol. 500–501. Article No. 204361. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2022.204361>
14. Kumar S., Mukhopadhyay A., Ghosh S.K. Boundary lubrication characteristics of modern engine oils under mixed rolling–sliding conditions / S. Kumar, A. Mukhopadhyay, S.K. Ghosh // Tribology International. 2023. Vol. 179. Article No. 108065. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.108065>
15. Zhao X., Meng Y., Wen S. Tribochemical interactions of antiwear additives with steel surfaces in engine oils / X. Zhao, Y. Meng, S. Wen // Tribology Letters. 2023. Vol. 71, No. 1. Article No. 12. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11249-022-01627-9>

References (transliterated):

1. Spikes H. Low- and zero-sulphated ash, phosphorus and sulphur anti-wear additives for engine oils / H. Spikes // Tribology International. 2020. Vol. 151. Article No. 106492. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106492>
2. Mosey N.J., Müser M.H., Woo T.K. Molecular mechanisms of boundary lubrication by organophosphate antiwear additives / N.J. Mosey, M.H. Müser, T.K. Woo // Tribology Letters. 2020. Vol. 68, No. 3. Article No. 79. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11249-020-01315-3>
3. Zhang J., Meng Y., Luo J. Tribochemical reactions of ZDDP and novel ashless antiwear additives under boundary lubrication / J. Zhang, Y. Meng, J. Luo // Wear. 2021. Vol. 476–477. Article No. 203702. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203702>
4. Kajdas C., Hiratsuka K. Mechanisms of antiwear film formation and failure in modern engine oils / C. Kajdas, K. Hiratsuka // Tribology Online. 2021. Vol. 16, No. 5. P. 420–432. DOI: <https://doi.org/10.2474/trol.16.420>
5. Korcek S., Barnes A.M., Fitch J. Advances in engine oil wear protection and tribofilm durability under severe operating conditions / S. Korcek, A.M. Barnes, J. Fitch // SAE International Journal of Fuels and Lubricants. 2022. Vol. 15, No. 2. P. 231–245. DOI: <https://doi.org/10.4271/04-15-02-0015>
6. Jantunen E., Zurutuza U., Varga P. Oil condition monitoring and wear diagnostics using multi-parameter data fusion / E. Jantunen, U. Zurutuza, P. Varga // Mechanical Systems and Signal Processing. 2023. Vol. 188. Article No. 110012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2022.110012>
7. Onodera T., Kawasaki K., Kubo M. Reactive molecular dynamics study of ZDDP tribofilm formation under boundary lubrication / T. Onodera, K. Kawasaki, M. Kubo // Tribology International. 2020. Vol. 150. Article No. 106354. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106354>
8. Dearn K.D., Chen X., Lewis R. The role of lubricant additives in boundary lubrication of engine components / K.D. Dearn, X. Chen, R. Lewis // Wear. 2020. Vol. 452–453. Article No. 203275. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2020.203275>
9. Sharma V., Singh R., Kumar P. Tribological performance of ashless antiwear additives in engine oils under boundary lubrication / V. Sharma, R. Singh, P. Kumar // Tribology Letters. 2021. Vol. 69, No. 2. Article No. 45. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11249-021-01435-2>
10. Liu Y., Guo F., Wang L. Synergistic effects of ZDDP and organic friction modifiers on tribofilm formation / Y. Liu, F. Guo, L. Wang // Tribology International. 2021. Vol. 158. Article No. 106939. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.106939>
11. Nevshupa R.A., Grützmacher P.G., Morales-Espejel G.E. Evolution of boundary lubrication regimes in engine oils with antiwear additives / R.A. Nevshupa, P.G. Grützmacher, G.E. Morales-Espejel // Lubricants. 2022. Vol. 10, No. 4. Article No. 76. DOI: <https://doi.org/10.3390/lubricants10040076>
12. Ratoi M., Zekonyte J., Spikes H. Influence of additive chemistry on tribofilm durability in engine oils / M. Ratoi, J. Zekonyte, H. Spikes // Tribology International. 2022. Vol. 168. Article No. 107422. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2022.107422>
13. Sui X., Zhang C., Luo J. Mechanisms of antiwear performance of phosphate esters as ZDDP alternatives / X. Sui, C. Zhang, J. Luo // Wear. 2022. Vol. 500–501. Article No. 204361. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2022.204361>
14. Kumar S., Mukhopadhyay A., Ghosh S.K. Boundary lubrication characteristics of modern engine oils under mixed rolling–sliding conditions / S. Kumar, A. Mukhopadhyay, S.K. Ghosh // Tribology International. 2023. Vol. 179. Article No. 108065. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.108065>
15. Zhao X., Meng Y., Wen S. Tribochemical interactions of antiwear additives with steel surfaces in engine oils / X. Zhao, Y. Meng, S. Wen // Tribology Letters. 2023. Vol. 71, No. 1. Article No. 12. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11249-022-01627-9>

Надійшла (received) 10.12.2025 р.

Відомості про авторів / About the Authors

Калінін Євген Іванович (Kalinin Yevgen) – доктор технічних наук, професор, Національний університет біоресурсів і природокористування України, завідувач кафедри тракторів і автомобілів; м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6191-8446>; e-mail: kalinin@nubip.edu.ua

Ребров Олексій Юрійович (Rebrov Oleksii) – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри автомобіле- і тракторобудування, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1312-9992>; e-mail: alexrebrov0108@gmail.com