
ЗАГАЛЬНІ ПИТАННЯ ПРОМИСЛОВОЇ ГІДРАВЛІКИ І ПНЕВМАТИКИ

DOI <https://doi.org/10.32782/1994-4691-2025-1-75-11>
УДК 621.89

ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ ГРАНИЧНОЇ МАСТИЛЬНОЇ ПЛІВКИ НА ПОВЕРХНЯХ ТЕРТЯ ГІДРАВЛІЧНИХ МАШИН

FEATURES OF THE FORMATION OF A BOUNDARY LUBRICANT FILM ON FRICTION SURFACES OF HYDRAULIC MACHINES

С. В. Воронін, д-р техн. наук, професор

ORCID: 0000-0001-8443-3222

Український державний університет залізничного транспорту

e-mail: voronin.sergey@ukr.net

Анотація. Уточнено механізм утворення граничної мастильної плівки на поверхнях деталей гідравлічних машин. Враховані особливості міцелярної структури присадки в оливі як фактора, що впливає на фізичну адсорбцію полярних молекул. Проведено розрахунок об'ємної концентрації присадки в неполярному розчиннику та виконане її співставлення зі значенням критичної концентрації міцелоутворення. Запропоновано метод інтенсифікації адсорбції присадки шляхом обробки оливи електричним полем. Проведені експериментальні дослідження впливу концентрації присадки та електричної обробки на характер зміни товщини граничної мастильної плівки. Дослідження виконували методом «стовпця кульок» з вимірюванням висоти стовпця до та після змочування. Підтверджено значення критичної концентрації міцелоутворення для обраної присадки, отримані значення концентрації при якій досягається максимум товщини мастильної плівки.

Ключові слова. гідравлічна олива, присадка, міцела, мастильна плівка, електричне поле.

Постановка проблеми.

Переважає більшість мобільних технологічних машин має гідравлічні силові приводи робочого обладнання. Найбільш відповідальними гідравлічними машинами таких приводів є аксіально-поршневі насоси та мотори, надійність яких визначає надійність гідропривода в цілому, а також експлуатаційні витрати.

Основними процесами, які протікають в цих гідравлічних машинах та визначають їх надійність, є тертя та зношування прецизійних з'єднань і підшипників кочення. Саме тому, високу актуальність має трибологічне забезпечення надійності конструкцій гідравлічних машин, як на етапі їх конструювання, так і в експлуатаційних умовах. До основних факторів, що визначають витрати на тертя та зношування можна віднести: якість матеріалів, клас точності деталі та поверхні тертя, мастильна здатність гідравлічної оливи та умови роботи гідромашини.

В даній роботі ми розглядаємо напрямок підвищення надійності гідравлічних машин в умовах експлуатації. Тут основним фактором впливу є мастильна здатність оливи та умови роботи – тиск оливи, температура, навантаження і швидкість тертя. При незмінних умовах роботи, головним впливовим фактором є мастильна здатність оливи, яка встановлюється по декількох показниках, а саме: в'язкість та параметри мастильної граничної плівки. В'язкість оливи впливає на умови гідродинамічного мащення, яке є переважним в гідромашини та характеризується мінімальними втратами на тертя та знос. Найменш вивченими є параметри мастильної граничної плівки, які визначають здатність гідравлічної оливи до захисту деталей тертя при граничному мащенні – як найбільш небезпечному з точки зору тертя та зношування при роботі в перехідних

режимах. Такі параметри плівки як товщина та несуча здатність обумовлені специфічним механізмом взаємодії оливи з поверхнею тертя на молекулярному рівні, при цьому вказана взаємодія тісно пов'язана з молекулярним складом та будовою самої оливи. Зважаючи на певну невизначеність, розкриття механізму утворення граничної мастильної плівки є актуальною науковою задачею.

Аналіз останніх досліджень.

Методи підвищення надійності гідравлічних машин та приводів можна поділити на 3 види: конструкційні [1, 2], технологічні [3] та експлуатаційні [3–7]. До конструктивних відносять структурне [1], міцнісне та функціональне резервування [2]. Технологічні методи базуються на забезпеченні заданих фізико-механічних властивостей та параметрів мікрогеометрії поверхонь тертя [3]. Експлуатаційні методи полягають в якісному виконанні технічного обслуговування [2], підтримці чистоти оливи [4] та її мастильної здатності [4–7]. Оскільки робота присвячена розгляду механізму формування граничної мастильної плівки, тоді розглянемо попередні дослідження з цього напрямку більш детально.

Для покращення мастильної здатності оливи в них догадають різні функціональні присадки [4–11]. Відомо, що всі присадки по своїй будові складаються головним чином з поверхнево-активних речовин (ПАР). Останні мають постійний або «жорсткий» електричний дипольний момент, що дозволяє їм під дією поверхневої енергії металу адсорбуватися на ньому [10]. Позитивна мастильна дія протизношувальних та антифрикційних присадок підтверджується роботами [4]. В них розглядаються сучасні оливи розчинні присадки, як при різних концентраціях призводять до значних трибологічних ефектів в контакті деталей гідромашин. Також останнім часом виконуються дослідження з використання нано-присадок до гідравлічних оливи [5, 6, 7]. Показано, що добавки наночастинок вуглецю [5] та нанокластерів іншого походження [6, 7] призводять до суттєвого зменшення тертя та, особливо, зношування деталей гідромашин, наприклад технологічних мобільних транспортних засобів [7].

Не зважаючи на високу ефективність присадок та добавок у сучасних гідравлічних оливах, їх позитивний трибологічний потенціал розкритий не повністю. Так відомо, що внаслідок кінетичних процесів, молекули присадки взаємодіють між собою й молекулами базової оливи, що призводить до утворення різноманітних по будові надмолекулярних структур: димери, міцели, свержміцелярні структури, рідкі кристали тощо (рис. 1). Наявність таких структур в об'ємі гідравлічних оливи доведена великою кількістю робіт, наприклад [8, 9], однак в цих роботах не розкритий зв'язок таких надмолекулярних структур та їх будови з механізмом фізичної адсорбції молекул ПАР на поверхнях деталей тертя, тобто процесом формування граничної мастильної плівки. Існують певні дослідження, в яких розглядають вплив так званих «зворотніх» міцел ПАР на коефіцієнт тертя та знос модельних зразків [8] та механізм утворення таких міцел при наявності води в оливі [9]. Цих даних не достатньо для розуміння механізму утворення граничної плівки ПАР та створення методів управління цим механізмом в експлуатаційних умовах, хоча згідно лабораторних та експлуатаційних досліджень [11–14] існують суттєві резерви покращення мастильної здатності гідравлічних та інших технічних оливи. Нприклад, в роботі [11] встановлений вплив електростатичного поля на фізико-хімічні та трибологічні властивості оливи з рідкокристалічними присадками.

В роботах [13, 14] підтверджено позитивний вплив електричної обробки моторної оливи на знос та ресурс деталей двигуна, а в роботі [14] отримана математична модель для розрахунку раціонального ресурсу аксіально-поршневого насоса при застосуванні очистки оливи та її електричної обробки. Тобто, наближення до наукового обґрунтування методів покращення мастильної здатності гідравлічних оливи вже існує, але необхідним залишається уточнення фізики процесу формування граничної плівки та підтвердження адекватності запропонованого механізму.

Методологія дослідження.

Метою дослідження є уточнення механізму взаємодії молекул присадки з поверхнею тертя з урахуванням міцелярної структури в об'ємі оливи, а також експериментальне підтвердження впливу міцелярної структури на товщину мастильної плівки, яка утворюється з молекул присадки на металевій поверхні.

Для уточнення механізму формування мастильної плівки застосовуємо методи фізичної та колоїдної хімії, а саме: існуючі уявлення про будову «зворотних» міцел ПАР у неполярному розчиннику – базовій оливі; фізичній адсорбції ПАР на металі з урахуванням розподілу силового поля поверхні.

Для експериментального дослідження товщини граничної мастильної плівки застосовуємо відпрацьований удосконалений метод «стовпця кульок», який описано в роботах [10]. Для експерименту обрали мінеральну гідравлічну оливу И-30 яка не містить присадок. В якості модельної присадки обрали лауринову кислоту, яку додавали до оливи в концентрації до 1 % по об'єму. Вимірювання товщини плівки виконували при температурі 60 °С з похибкою ± 1 °С.

Результати дослідження.

Кожна молекулярна структура, наведена на рис. 1, має зовнішню й внутрішню енергію, а її наявність в базовій оливі визначається наступними головними характеристиками: концентрацією присадки; природою ПАР; структурою базової оливи, температурою тощо. У такому виді надмолекулярні структури попадають у зазори деталей тертя гідромашин та по-своєму впливають на механізм формування граничної плівки.

Широко відомо [10], що мастильна плівка складається з першого мономолекулярного шару присадки, а вище, якщо сприяють умови, на ньому формується полімолекулярний шар (рис. 2).

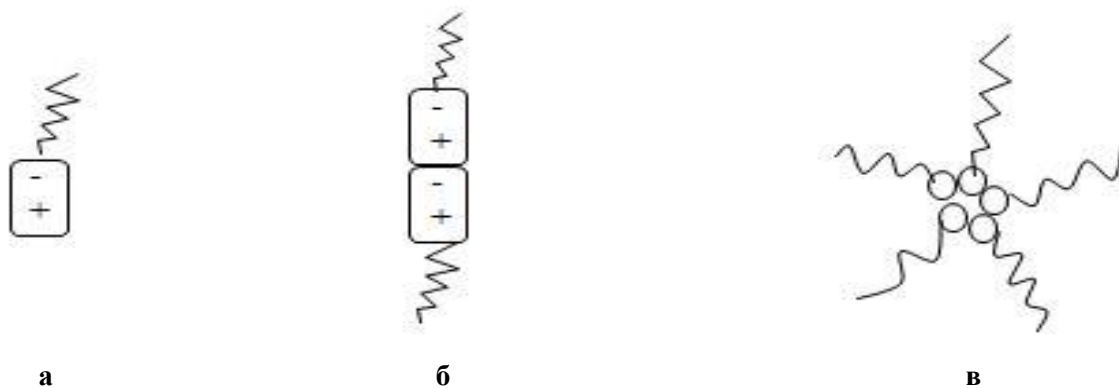


Рис.1. Надмолекулярні структури присадки:
 а - мономер (одиначна молекула); б - димер; в – «зворотна» міцела

Механізм формування мастильної плівки, наведеної на рис. 2, включає наступні основні етапи:

- формування мономолекулярного шару присадки (1),
- формування полімолекулярного шару з димерів (2).

Формування первинного адсорбційного шару (мономолекулярного) засновано на адсорбційному процесі, у якому полярно-активна частина присадки безпосередньо взаємодіє з поверхнею тертя.

Формування полімолекулярного шару протікає як нагромадження й орієнтація димерів з послідовним утворенням одного ряду за іншим.

Помітимо важливу деталь, що описаний механізм формування мастильної плівки вимагає відповідної концентрації присадки в об'ємі базової оливи – (кількість

мономерів і димерів). Крім того, товщина мастильної плівки, як показують раніше проведені дослідження, залежить і від області дії поверхневої енергії металу.

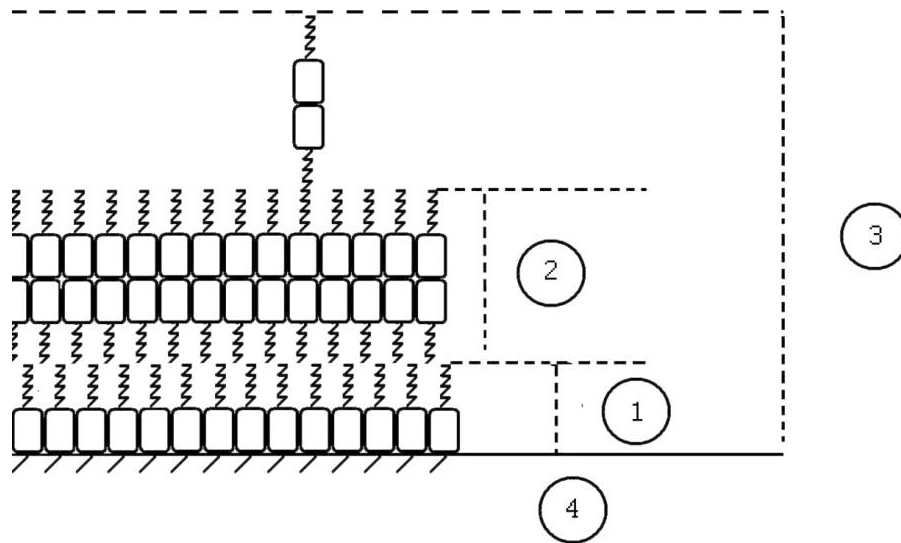


Рис. 2. Структура мастильної плівки:

1 – мономолекулярний шар; 2 – димерний ряд; 3 – змащувальний шар; 4 – поверхня тертя

Відповідно до сучасної уяви зерно металу являє собою іонну решітку, занурену в електронну рідину, і має потенційне поле. Таке поле поширюється на сотні й тисячі ангстрем. Відповідно до теоретичних і експериментальних досліджень, це поле убуває по нормалі від поверхні твердої фази. Схематичний розподіл енергії силового поля поверхні тертя в мастильній плівці можна представити у вигляді кривої 5 (рис. 3).

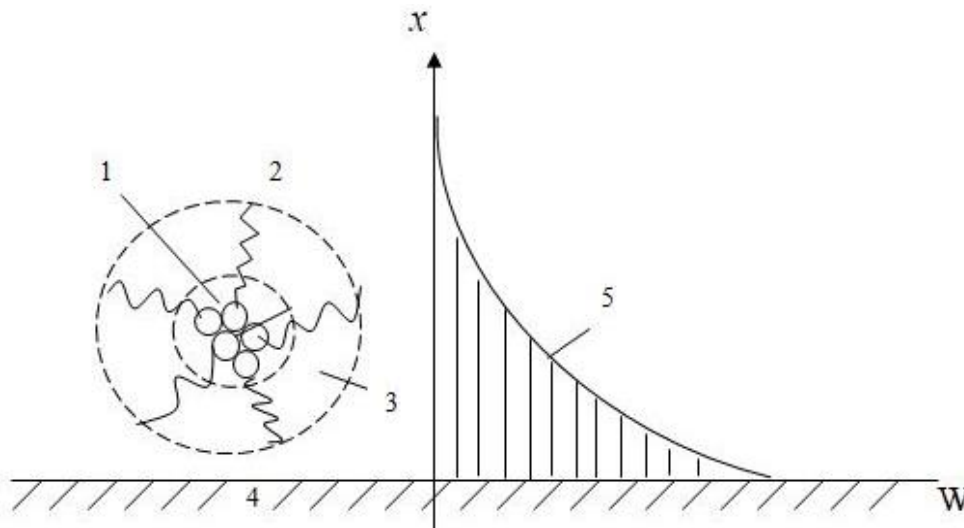


Рис. 3. Надмолекулярна структура оливи, що перебуває в області дії силового поля поверхні тертя: 1 – ядро міцели; 2 – вуглеводний радикал молекули ПАР; 3 – сольватна шуба (оболонка міцели); 4 – поверхня тертя; 5 – крива розподілу енергії силового поля поверхні тертя

Адсорбційний процес протікає постійно, тому що відбувається обмін молекул ПАР мастильної плівки з об'ємом основного потоку гідравлічної оливи, що подається в зазори деталей тертя. Якщо порівняти структуру гідравлічної оливи до потрапляння у зазори пар тертя й структуру мастильної плівки, то цілком очевидно, що силове поле поверхні тертя виконує функції руйнування надмолекулярних структур і формування мастильної плівки згідно механізму, описаного вище на рис. 2. Такий процес

відбувається за певних енергетичних умов. Розглянемо його на прикладі руйнування типової надмолекулярної структури – «зворотної» міцели, сформованої попередньо в гідравлічній оливі за рахунок кінетичних процесів. При цьому слід сказати, що присадки, згідно аналізу їх стану в базовій оливі, залежно від концентрації загалом перебувають в агрегованому стані (рис. 3).

Проведемо енергетичний аналіз із позицій руйнування такої міцелярної структури (рис. 3) під дією силового поля поверхні тертя. Вважаємо, що енергія взаємодії між молекулами ПАР в надмолекулярній структурі дорівнює – E_m , а енергія силового поля поверхні тертя – $E_{\text{П}}$. Помітимо, що остання нелінійно убуває по нормалі від поверхні тертя, пропорційно 3 – 4 ступені відстані [10]. Руйнування надмолекулярної структури – міцели відбудеться в тому випадку, якщо енергія силового поля поверхні тертя перевищує енергію зв'язку молекул у ній, а надалі утворюється мономолекулярний шар присадки, що адсорбується на поверхні тертя по закономірностям фізичної конкурентної адсорбції. Якщо енергії силового поля поверхні тертя недостатньо для руйнування міцел, тобто, $E_{\text{П}} < E_m$, тоді процес адсорбції не відбудеться, тому що до поверхні тертя така структура не може наблизитися, оскільки полярно-активна частина присадки розташована в ядрі. З позицій поляризації вуглеводних радикалів надмолекулярної структури за рахунок силового поля поверхні тертя можлива взаємодія такої структури з поверхнею тертя, однак їх зв'язок відрізняється слабкою енергією.

Для вирішення проблеми формування товстого полімолекулярного шару мастильної плівки з міцел ПАР ключову роль з точки зору руйнування надмолекулярної структури буде виконувати зовнішнє силове поле або кінетичні процеси, пов'язані з температурою.

В цілому, на процес формування мастильної плівки впливають наступні основні фактори:

- область дії та характер розподілу силового поля поверхні тертя;
- концентрація молекул поверхнево-активних речовин (від неї залежить, у якому стані ці молекули будуть перебувати в базовій оливі (мономерному, димерному, міцелярному тощо));
- електронна будова та геометрія молекул ПАР (визначальними параметрами в таких молекул є електричний дипольний момент і довжина вуглеводного радикала);
- хімічний склад базової оливи та наявність забруднень в ній;
- величина зовнішнього навантаження, що діє на мастильну плівку;
- температура в області взаємодії як кінетичний фактор, що сприяє руйнуванню міцел.

Зупинимося на аналізі впливу «зворотних» міцел на товщину адсорбційної плівки мастильної плівки. Відзначимо особливість, що визначає стан молекул ПАР в гідравлічній оливі. Концентрація присадки в оливі у порівнянні з її критичною концентрацією міцелоутворення (ККМ) є визначальним фактором, який впливає на процес фізичної адсорбції. Згідно попередніх досліджень, критична концентрація міцелоутворення для жирних кислот складає близько 0,9...2,2 моль/м³ [8].

Якщо відомим є відсотковий вміст присадки в оливі ε , тоді об'ємну концентрацію молекул ПАР можна визначити по залежності

$$c_{\text{ПАР}} = \frac{\rho \cdot \varepsilon}{100 \cdot M}, \quad (1)$$

де M – молярна маса присадки, кг/моль; ρ – щільність, кг/м³.

Для лауринової кислоти, молярна маса якої дорівнює $M = 0,189$ кг/моль, а щільність $\rho \approx 900$ кг/м³, об'ємна концентрація складе 47,6 моль/м³ при $\varepsilon = 1\%$. При цьому, значення її ККМ в мінеральній нафтовій оливі складає приблизно 2 моль/м³ при температурі 60 °С [8].

Легко побачити, що концентрація присадок в сучасних гідравлічних оливах перевищує власні значення ККМ. Це говорить про те, що у переважна більшість молекул присадок знаходиться в агрегованому (міцелярному) стані, як слід, структура олив не відповідає умовам ефективного формування граничної мастильної плівки, тобто збільшення концентрації присадки не призводить до ефективного формування плівки, а навпаки, після ККМ погіршує цей процес.

Для інтенсифікації адсорбційного процесу молекул ПАР необхідно збільшити їх локальну концентрацію безпосередньо біля поверхні тертя в мономірному або іншому високо полярному стані, що дозволить покращити умови формування мастильної плівки. Нам вважається найбільш доцільним застосувати дію на оливу з присадкою зовнішнім електричним полем (ЕП), що було апробовано для моторних олив в роботах [12, 13]. При цьому головною умовою є достатність напруженості електричного поля для руйнування міцелярних структур присадки.

Враховуючи запропонований механізм формування мастильної плівки та його інтенсифікації електричним полем були отримані результати вимірювань товщини граничної мастильної плівки в лабораторних умовах, які наведені на рис. 4.

Як видно з рис.4, характер зміни товщини мастильної плівки від концентрації присадки різний. Для оливи, в яку додавали присадку та не застосовували обробку ЕП (рис.4, крива 1), існує максимум товщини при концентрації 0,2 %, а подальше зростання концентрації погіршує умови формування плівки, тобто її товщина зменшується. Це пояснюється досягненням ККМ лауринової кислоти при об'ємній концентрації 0,2 % та заданій температурі. Для оливи яка підлягала обробці ЕП (рис.4, крива 2) область максимуму зникає, а товщина плівки нелінійно зростає, навіть при перевищенні значення ККМ, що говорить про руйнування «зворотних» міцел та інтенсифікування адсорбції молекул присадки на металі.

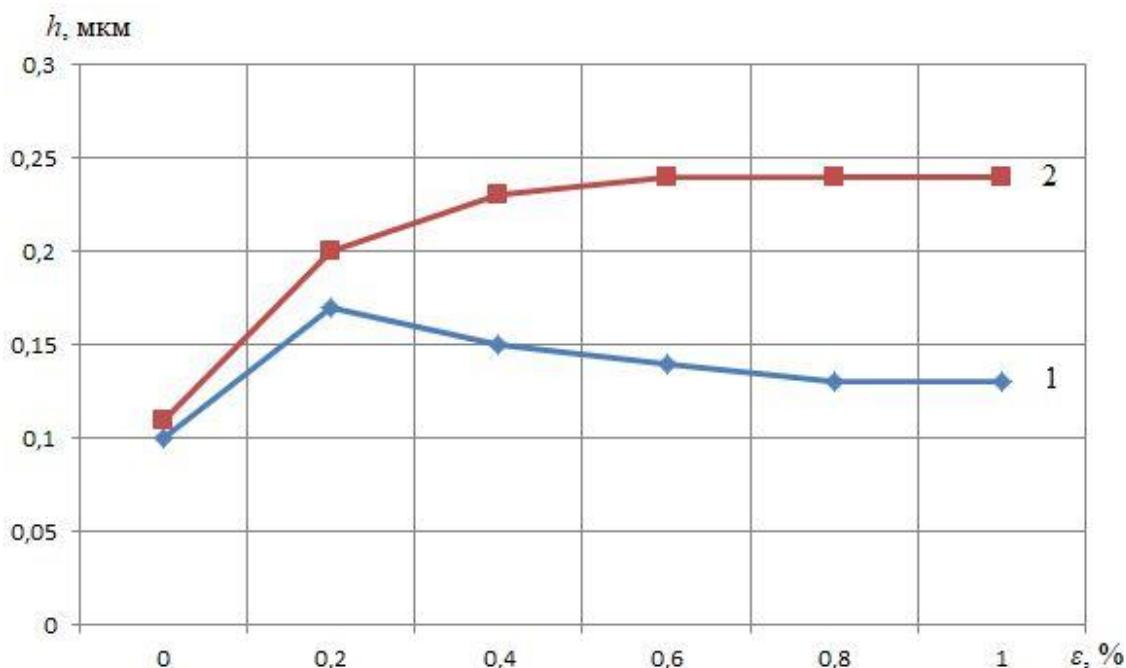


Рис. 4. Експериментальні значення товщини граничної мастильної плівки, отримані методом «стовпця кульок» за різних концентрацій лауринової кислоти:
 1 – олива з присадкою; 2 – олива з присадкою та оброблена ЕП

Отримані результати будуть цікавими для подальшого прогнозування надійності гідравлічних машин, але потребують експериментальних досліджень процесу зношування в умовах зміни концентрації присадки та електричної обробки оливи.

Висновки.

1. Уточнено механізм формування граничної мастильної плівки, згідно якого встановлено, що наявність зворотних міцел присадки в гідравлічній оливі негативно впливає на процес фізичної адсорбції молекул. Розрахунковим шляхом доведено, що присадки в сучасних гідравлічних оливах перебувають в міцелярному стані, оскільки їх концентрація перевищує ККМ, тобто потребують зовнішніх впливів для інтенсифікації адсорбції на поверхнях тертя гідравлічних машин.

2. Запропоновано і досліджено метод інтенсифікації адсорбції присадки на основі попередньої обробки гідравлічної оливи ЕП. Отримані різні характери зміни товщини мастильної плівки для гідравлічної оливи з присадкою та такої ж оливи з додатковою обробкою ЕП, що підтвердило ефективність запропонованого методу, з точки зору особливостей формування граничної мастильної плівки.

3. Отримані результати будуть корисними для подальшого прогнозування зносостійкості деталей та надійності гідравлічних машин, але потребують інтерпретації шляхом постановки експериментальних або стендових досліджень процесу зношування в умовах застосування різних гідравлічних оливи, зміни концентрації присадки в них, відсутності або застосування попередньої електричної обробки оливи.

Список використаних джерел

1. Батлук В.А., Федоренко І.М. Оцінка надійності мехатронних гідроагрегатів на стадії їх проектування. *Східно-Європейський журнал передових технологій*, 2009. №5/6 (41). С. 21–24.
2. Ремарчук М.П., Чмуж Я.В., Євтушенко А.В., Галицький О.О. Удосконалення гідромеханічних пристроїв на етапі проектування машин для створення дренажних каналів. *Промислова гідравліка і пневматика*, 2021. № 2 (66). С. 27–42.
3. Мельянцева П.Т. Забезпечення надійності аксіально-поршневих агрегатів гідравлічних трансмісій в процесі їх ремонту конструктивними заходами. *Modern engineering and innovative technologies*, 2024. 32 (1). 20–28. <https://doi.org/10.30890/2567-5273.2024-32-00-086>
4. Pabsetti P., Murty, R S V N, Bhoje1, Jai, Mathew S. and other. Performance of hydraulic oils and its additives in fluid power system: A review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2023. 1161. 012009. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1161/1/012009>
5. Zhao, J., Huang, Y., He Y. Nanolubricant additives: A review. *Friction*, 2021. №9. 891–917. <https://doi.org/10.1007/s40544-020-0450-8>
6. Gupta, R., Harsha, A. Antiwear and extreme pressure performance of castor oil with nano-additives. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 2018. 232(9). 1055-1067. <https://doi.org/10.1177/1350650117739159>
7. Duque-Sarmiento D.A., Baño-Morales D.A. Assessment of hydraulic oil properties during operation of a mini loader. *Lubricants*, 2024. 12(9). 320. <https://doi.org/10.3390/lubricants12090320>
8. Gu H., Hirayama T. Effect of surfactant self-assembly on lubrication performance in oil-based systems: the role of reverse micelles and vesicles. *Frontiers in Mechanical Engineering*, 2025. 11:1608716. <https://doi.org/10.3389/fmech.2025.1608716>
9. Sheikh Omar A. Motamen Salehi F., Farooq U., Morina A. Additives depletion by water contamination and its influences on engine oil performance. *Tribology Letters*, 2024. 72(3). <https://doi.org/10.1007/s11249-024-01876-y>
10. Александров Є.Є., Кравець І.А., Лисіков Є.М. Підвищення ресурсу технічних систем шляхом використання електричних та магнітних полів: монографія. Харків: НТУ «ХПІ», 2006. 544 с.
11. Воронін С.В., Сафонюк І.Ю., Аношкіна Н.М., Харківський О.С. Дослідження впливу концентрації рідкокристалічної присадки та електричного поля на фізико-хімічні властивості індустриальної оливи. *Вісник Національного Авіаційного Університету*, 2020. Т. 83. № 2. С. 70–76.
12. Воронін С.В., Стефанов В.О., Харківський О.С. Експлуатаційні випробування пристрою для електростатичної обробки моторної оливи. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*, 2022. Вип. 200. С.11–24.

13. Воронін С.В., Харківський О.С., Губін О.О. Вплив напрацювання та електричної обробки мастильного матеріалу на зносостійкість підшипників ковзання. Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту, 2023. Вип. 205. С. 6–13.

14. Воронін С.В., Стефанов В.О., Васянович Р.С., Трифонов Т.В., Півоваров С.О. Методика та приклад розрахунку раціонального ресурсу аксіально-плунжерних гідромашин мобільної техніки. Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту, 2024. Вип. 208. С. 36–43.

Стаття надійшла до редакції 27.05.2025

Стаття прийнята 30.05.2025

Статтю опубліковано 20.06.2025



FEATURES OF THE FORMATION OF A BOUNDARY LUBRICANT FILM ON FRICTION SURFACES OF HYDRAULIC MACHINES

S. Voronin

Ukrainian State University of Railway Transport

Summary

Based on the concepts of physical and colloidal chemistry, the mechanism of formation of a boundary lubricating film on metal friction surfaces of hydraulic machine parts has been clarified. The features of the supramolecular micellar structure of the additive in the base oil have been taken into account as a factor affecting the process of physical adsorption of surface-active molecules. The volumetric concentration of lauric acid in a non-polar mineral hydrocarbon solvent - industrial base oil - has been calculated. The calculated data have been compared with the value of the critical concentration of micelle formation of lauric acid at the operating temperature of hydraulic oil. It has been established that the real concentration of the additive far exceeds the critical concentration, i.e., additives in modern oils are mainly in a micellar state, which does not contribute to the conditions for effective formation of a lubricating film. A method of intensification of physical adsorption of additive molecules by pre-treatment of the oil with an electric field has been proposed. To confirm the refined mechanism of lubricating film formation and the method of intensification of additive adsorption, experimental studies of the influence of the additive concentration in oil and electrical treatment on the nature of the change in the thickness of the boundary lubricating film were conducted. The studies were performed using the “column of balls” method by wetting the balls with the oil under study and measuring the height of the column before and after wetting. A different nature of the change in the film thickness was established depending on the additive concentration for oil without electrical treatment and with treatment. The value of the critical concentration of micelle formation for the selected additive at a given temperature was experimentally confirmed, and the concentration values at which the maximum thickness of the lubricating film is achieved were obtained.

Keywords: hydraulic oil, additive, micelle, lubricating film, electric field.