

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТРАНСПОРТНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

ГЛУХОНЕЦЬ Андрій Олексійович



УДК 621.891

**ЕЛАСТОГІДРОДИНАМІЧНІ АСПЕКТИ МАЩЕННЯ В УМОВАХ
ЛОКАЛЬНИХ КОНТАКТІВ ТЕРТЯ**

Спеціальність 05.02.04 – «Тертя та зношування в машинах»

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Національному транспортному університеті (НТУ)
Міністерства освіти і науки України, м. Київ.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Дмитриченко Микола Федорович,
Національний транспортний університет, м. Київ,
ректор.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Диха Олександр Володимирович
Хмельницький національний університет,
м. Хмельницький, професор кафедри
трибології, автомобілів та матеріалознавства;

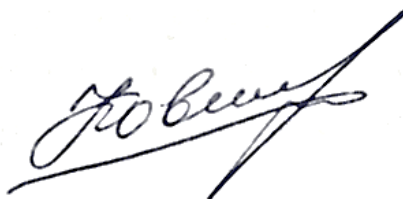
кандидат технічних наук, доцент
Лабунець Василь Федорович,
Національний авіаційний університет, м. Київ,
професор кафедри машинознавства, стандартизації та
сертифікації.

Захист дисертації відбудеться 27 квітня 2021 р. о 10⁰⁰ на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.059.03 в Національному транспортному університеті за адресою: 01010, м. Київ, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, ауд. 209

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного транспортного університету за адресою: 01103, м. Київ, вул. М. Бойчука, 42.

Автореферат розісланий "25" березня 2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



С.В. Ковбасенко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Для розвитку сучасних машин необхідно підвищення їх продуктивності, надійності, конкурентоспроможності та ефективності, зниження матеріалоємності, енергоспоживання, шкідливого впливу на людину і природу та ін.

Як показує світовий досвід, досягнення заданого рівня надійності більшості машин і механізмів неможливо без забезпечення необхідних експлуатаційних властивостей вузлів тертя. Це вимагає проведення як теоретичних, так і практичних досліджень триботехнічних показників матеріалів і рухомих сполучень.

Процес зношування спряжених поверхонь призводить до зміни довговічності та працездатності трибомеханічних систем, від яких в багатьох випадках залежить їх надійність. Отже, виявлення основних показників працездатності, які залежать від ступеня зношуваності пар тертя, і визначення допустимих величин зміни цих показників є необхідною умовою для прогнозування технічного стану трибоспряжень.

Виходячи із загальних досліджень випливає, що для подальшого підвищення надійності, довговічності і навантажувальної здатності трибомеханічних систем вкрай необхідно розкриття механізму мастильної дії мастильних середовищ в умовах рясного мащення і обмеженого мащення на етапі припрацювання (самопристосування), сталого стану і катастрофічного пошкодження (вичерпання ресурсу) при стаціонарному навантаженні.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана відповідно до договорів Міністерства освіти і науки України в напрямку «Енергетика та енергоефективність» науково – дослідної роботи за рахунок державного бюджету за темою №19 «Дослідження закономірностей формування граничних мастильних шарів у оливах з різним якісним станом з метою оптимізації ресурсу елементів трибосистем» (№ РК 0113U000296 в період 01.01.2013р. – 31.12.2014р); та науково – дослідної роботи за рахунок державного бюджету за темою № 34 «Збільшення ресурсу використання універсальної моторно-трансмісійної оливи у вітчизняних гусеничних машинах за рахунок оптимізації структурного складу оливи» (№РК 0115U002289 в період 01.01.2015 – 31.12.2016рр.).

Мета роботи – подовження ресурсу роботи трибомеханічних систем з локальною формою контакту за рахунок удосконалення їх триботехнічних характеристик шляхом оптимального підбору мастильних матеріалів та встановлення динаміки формування змашувальної плівки при рясному та обмеженому мащенні.

Завдання дослідження:

– визначення кращого зразка оливи з поліпшеними протизношувальними та антифрикційними властивостями при різних температурах – 20°C та 70°C за рахунок проведених триботехнічних вимірювань об'ємного зносу та коефіцієнту тертя на трибометрі CSM Instruments SA;

- встановлення ефективності мащення оливами різного експлуатаційного призначення при різних видах тертя (умова чистого кочення та кочення з проковзуванням);
- дослідження кінетики зміни товщини змащувального шару в контакті тертя в умовах рясного та обмеженого мащення;
- визначення реологічних та антифрикційних властивостей змащувальних матеріалів в залежності від режимів мащення в контакті;
- визначення ступеня впливу основних експлуатаційних чинників, які впливають на динаміку формування товщини змащувального шару в контакті;
- створення аналітичної моделі ефективності мащення на основі методу найменших квадратів, яка дозволяє визначити ступінь впливу експлуатаційних чинників і, як наслідок, можливість прогнозувати довговічність неконформних вузлів тертя.

Об’єкт дослідження – динаміка формування змащувальної плівки в локальному контакті тертя в залежності від фізико-хімічних властивостей мастильного матеріалу та умов мащення.

Предмет дослідження – вплив сумарної швидкості кочення пар тертя та навантаження в контакті на формування товщини змащувальної плівки.

Методи дослідження – експериментальне визначення динаміки товщини мастильного шару в точковому контакті та визначення антифрикційних і реологічних характеристик олив різного експлуатаційного призначення; аналітичне моделювання умов експлуатації трибомеханічних систем.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Запропоновано комплексний метод оптимального вибору модифікаторів тертя з поліпшеними протизношувальними і антифрикційними властивостями, який дозволяє створювати моторно-трансмісійні оливи з поліпшеними триботехнічними властивостями.

2. Встановлені механізми формування початкової товщини змащувального шару в контакті та її зростання при збільшенні сумарної швидкості кочення в залежності від набуття змащувальними матеріалами неньютонівських властивостей в контакті в момент пуску, наявності різних базових олив, кількісної концентрації активованих вуглеводневих компонентів та імовірності релаксації мастильного матеріалу.

3. Встановлено вплив ефективної в'язкості олив в контакті на кінетику зміни антифрикційних та реологічних властивостей мастильних матеріалів від інтенсивності деструкційних змін поліальфаолефінової складової в умовах рясного та обмеженого мащення та типу структуризації граничних мастильних шарів.

Практичне значення результатів досліджень складають:

- закономірності щодо впливу тривалості використання модифікованих універсальних моторно-трансмісійних олив (УМТО) на їх реологічні характеристики в умовах кочення з проковзуванням;

- кращі протизношувальні, протизадирні й антифрикційні властивості моторно-трансмісійної оливи ПРОТЕК ЄМТ-8 в нестационарних умовах тертя в порівнянні з моторно-трансмісійною оливою ЄМТ-8, що визначені на основі експериментальних даних;

- аналітична модель мащення точкового контакту при використанні на основі оцінки розподілу товщини мастильного шару в центральній зоні контакту в залежності від експлуатаційних чинників (навантаження, швидкість, температура) та реологічних властивостей мастильних матеріалів, що дозволяє визначити оптимальні умови експлуатації неконформних вузлів тертя при рясному та обмеженому мащенні.

Особистий внесок здобувача. Всі основні результати, що виносяться на захист, отримані здобувачем самостійно. В роботах у співавторстві здобувачу належать: [1] – аналіз впливу залишкового ресурсу мастильних матеріалів на структурний стан поверхневих шарів трибосполучень; [2] – аналіз закономірностей утворення граничних мастильних плівок в залежності від матеріалу пар тертя; [3] – встановлений вплив терміну служби мастильних матеріалів на деформаційні та витривалісні характеристики поверхневих слоїв трибоспряжень; [4] – визначення основних фізико-хімічних характеристик досліджуваного спектру мастильних матеріалів; [5] – запропоновано аналітичну модель мащення локального контакту на основі оцінки розподілу товщини мастильного шару в центральній зоні контакту при врахуванні кореляційного зв'язку між експлуатаційними (швидкісні та навантажувальні), температурними чинниками та реологічними властивостями змащувального матеріалу; [6] – встановлено динаміку формування товщини мастильного шару в умовах точкового контакту; [7,8] – досліджено ефективну в'язкість мастильного матеріалу в зоні контакту при масляному голодуванні в точковому контакті; [9] – встановлений вплив параметру швидкості кочення на кінетику формування товщини змащувального шару; [10,11] – розроблена аналітична модель процесу зміни товщини мастильного шару в точковому контакті;

Дослідження, які були виконані в співавторстві і містяться в дисертаційній роботі, проведені при безпосередній участі автора на всіх етапах роботи. В цілому автору належить теоретичне обґрунтування, вибір і розробка методики дослідження, обґрунтування і узагальнення отриманих результатів, практичні рекомендації, впровадження розробок в діяльність.

Апробація результатів дисертації. Результати роботи доповідались та обговорювались на наукових конференціях професорсько – викладацького складу і студентів НТУ (Київ 2015, 2017, 2018), 14-й Международной научно-технической конференции (69-й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных работников, докторантов и аспирантов БНТУ), (Мінськ, Білорусь, 2016), 15-й Международной научно-технической конференции (70-й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных работников, докторантов и аспирантов БНТУ), (Мінськ, Білорусь, 2017), III-й Всеукраїнській науково-

практичній конференції «Новітні шляхи створення, експлуатації, ремонту і сервісу автомобілів» (Миколаїв, 2018).

Публікації. Основні положення дисертації і результати досліджень опубліковані в 11 друкованих працях, з них 2 входять у реферативну базу даних SCOPUS, 2 наукові статті у фахових виданнях України, 1 стаття у закордонному виданні, а також 6 публікацій у збірниках за матеріалами конференцій.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається зі змісту, вступу, чотирьох розділів основної частини, загальних висновків, списку використаних джерел, який налічує 130 найменувань і додатки. Робота викладена на 192 сторінках (з них 174 сторінок основного тексту, 63 рисунки, 8 таблиць).

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету та основні завдання дослідження, відображено наукову новизну отриманих результатів, їхню практичну цінність; наведено інформацію про апробацію результатів досліджень, а також зміст роботи та структуру дисертації, публікації, в яких відображено основні результати дисертаційного дослідження.

У **першому** розділі наведено аналіз літературних даних щодо впливу експлуатаційних факторів та триботехнічних процесів на довговічність трибомеханічних систем.

Розглянуто сучасні уявлення про режими мащення в трибомеханічних системах. Трибологічні процеси, тобто процеси контакту, тертя і зношування, як правило, пов'язані з безпосередніми фізичними взаємодіями між здійснюючими відносний рух поверхнями. На всі ці процеси впливає змащувальний матеріал, призначення якого полягає в поділі рухомих відносно одна одної поверхонь плівкою матеріалу, здатного піддаватися зсуву з малим опором і без будь-яких ушкоджень поверхонь.

На даний момент еластогідродинамічна (ЕГД) теорія тертя вивчається в численних закордонних і вітчизняних теоретичних роботах, а також в експериментальних працях, переважна кількість яких у розглянутій нами ділянці кочення поки ще відносно невелика.

У більшості теоретичних робіт, присвячених визначенню основних властивостей ЕГД змащувального шару, викладено припущення про ідеальну гладкість контактуючих поверхонь. Реальні поверхні тертя завжди мають шорсткість, а товщина ЕГД-шару мащення дорівнює висоті мікронерівностей взаємодіючих поверхонь.

Сучасний стан ЕГД-мащення показує, що процес утворення ЕГД-мастильного шару вивчений досить добре, і товщини таких шарів можуть бути розраховані з великою точністю. Однак на практиці умови роботи часто далекі від ідеальних, які передбачаються в більшості теоретичних та експериментальних дослідженнях. Нерідко ігнорується важливий практичний фактор, а саме подача й розподіл оливи в межах контакту. Режим мастильного

голодування, що часто існує на практиці, але не завжди передбачений у теорії, може вплинути на товщину мастильного шару – основну характеристику ЕГД-контакту, що визначає мастильну здатність мастильних матеріалів, і таким чином на зносостійкість поверхонь тертя.

На основі проведеного аналізу літературних джерел визначені мета і задачі дослідження.

У **другому** розділі розглядаються методи та засоби експериментальних досліджень і установок, як попередніх поколінь, що значно відстають від сучасних вимог, особливо, щодо методів досліджень, що суттєво ускладнює процес обробки і визначення основних експериментальних показників, так і сучасних систем та обладнання. Використання сучасного обладнання для проведення досліджень на тертя та зношування дає можливість досягнути високої точності та рівня обробки отриманих результатів наукових досліджень. Так, наприклад, використання трибометра CSM Instruments SA (рис. 1) дає можливість отримати експериментальні результати з високим ступенем точності до реальних умов роботи трибомеханічних систем.

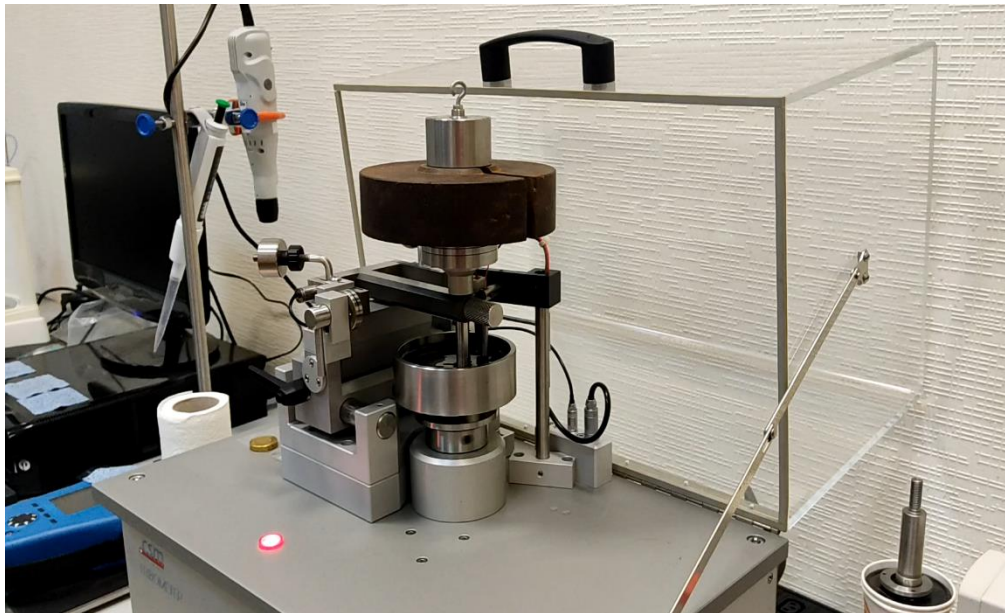


Рисунок 1 – Загальний вигляд трибометра CSM Instruments SA

Залежно від матеріалів пари тертя по різному відбувається процес зносу. Існує 3 можливих ситуації для різної зносостійкості зразків: кульки і плоского диска: 1) тільки знос кульки; 2) тільки знос диска; 3) знос кульки і диска.

На практиці втрата матеріалу може бути визначена з використанням профілометра по сліду зношування. Варіації навколо сліду зношування можуть бути викликані деформацією частинок зношування або пластику. Таким чином, має бути отримано достатню кількість результатів, щоб досягти задовільного значення. Більшість встановленого на сучасні трибометри профілометричного програмного забезпечення може легко обчислити площу сліду.

Також для досліджень використовується модернізований робочий стенд (рис. 2) з метою дослідження характеру поведінки товщини мастильного

шару в широкому діапазоні параметрів вузла тертя при застосуванні інтерферометричного методу. При використанні методу оптичної інтерферометрії для визначення товщини мастильного шару в локальному контакті тертя було встановлено залежність процесу формування товщини мастильного шару від впливу наступних факторів: фізико-хімічного складу досліджуваного мастильного матеріалу, швидкості кочення та кочення з проковзуванням, навантаження в контакті, температури змащувального матеріалу.

Застосування кольорової інтерференції дозволяє виключити отримання досить широких світлих кілець, які характерні для монохроматичного світла, що ускладнює точне визначення розподілу товщини мастильного шару. Кольорова інтерференція дозволяє забезпечити точні вимірювання товщини мастильного шару до 1,5 мкм і виміряти ультратонкі мастильні шари до 0,02 мкм.



Рисунок 2 – Загальний вигляд модернізованого робочого стану

У **третьому** розділі представлені експериментальні дослідження триботехнічних характеристик мастильних матеріалів в умовах рясного мащення. Основні експлуатаційні характеристики будь-якої трибосистеми значною мірою залежать від правильного підбору, якості та властивостей конструкційних і мастильних матеріалів, шорсткості поверхонь (зокрема об'ємної просторової конфігурації) та макрогеометричних показників.

Для дослідження триботехнічних властивостей мастильних матеріалів проведено комплексні лабораторні випробування на трибометрі CSM Instruments SA, при цьому, були використані наступні зразки:

зразок №1 – I-40A – нейтральна базова олива мінерального походження;

зразок №2 – I-40A+0,6% модифікатора тертя на основі дітіофосфату цинку (ДФЦ);

зразок №3 – I-40A+0,05% беззольного (Zn-Free) модифікатора тертя на основі фосфідно-сульфідних сполук.

В якості досліджуваного матеріалу було обрано кульку діаметром $D=6\text{мм}$ зі сталі 304 (HRC – 135-200, HV10). Температура дослідження $t = 20^\circ\text{C}$ та 70°C . Вертикальне навантаження = 59,03 Н. Вологість повітря – 75%.

За результатами триботехнічних вимірювань об'ємного зносу та початкового коефіцієнту тертя в залежності від пробігу впродовж 7500 м на трибометрі CSM Instruments SA було встановлено кращий зразок моторної оливи, що містить 0,05% беззольного (Zn-Free) модифікатора тертя з поліпшеними протизношувальними властивостями при різних температурах - 20 та 70°C . В процесі досліджень зафіксована стабілізація коефіцієнту тертя для усіх зразків при локальному нагріві оливи до 70°C (рис. 3 та рис. 4) впродовж всього часу пробігу, що пояснює створення оптимальної еластогідродинамічної плівки, яка позитивно впливає на антифрикційні властивості.

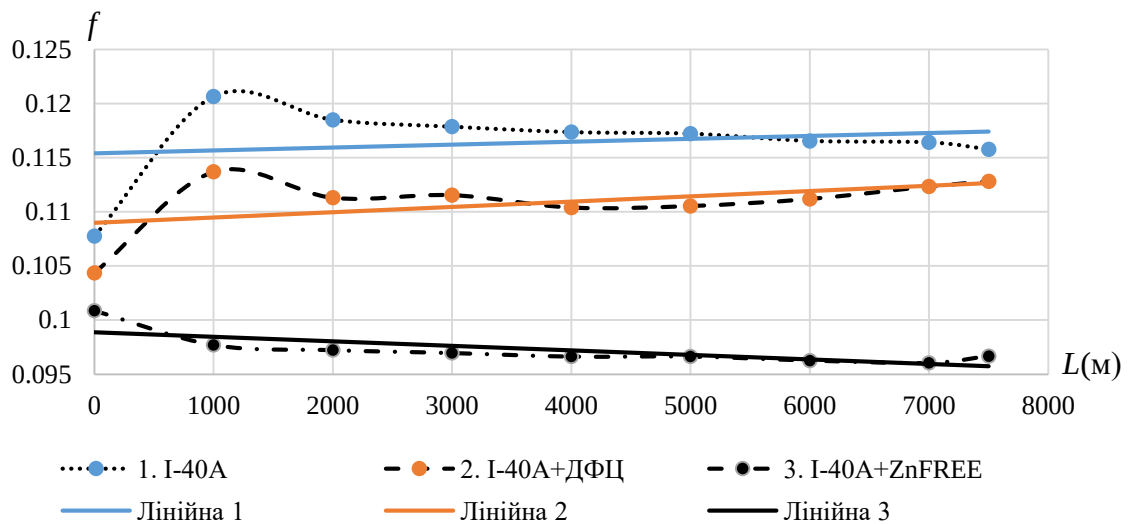


Рисунок 3 – Залежність коефіцієнту тертя f від пробігу L при $t=20^\circ\text{C}$ для досліджуваних зразків

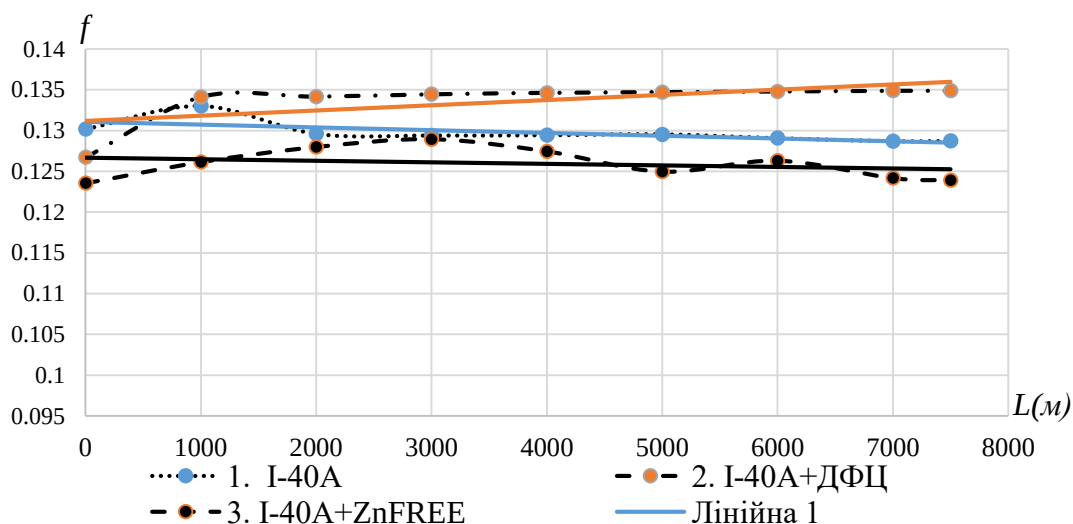


Рисунок 4 – Залежність коефіцієнту тертя f від пробігу L при $t=70^{\circ}\text{C}$ для досліджуваних зразків

Основною задачею наступного дослідження при використанні методу оптичної інтерферометрії є встановлення впливу експлуатаційного параметру пар тертя – швидкості кочення при рясному мащенні (за умови чистого кочення та кочення з проковзуванням) на динаміку процесу формування товщини мастильного шару в центральній зоні контакту. Дослідження проводились при контактних напругах 251,5; 316,9; 362,7 МПа в умовах поступового збільшення сумарної швидкості кочення від 0 до 3,2 м/с, температура – 20°C . При дослідженні використовувалися 6 марок олив: 1) моторна олива TEMOL CLASSIC 15w40; 2) моторна олива M8Г2К; 3) моторна олива M10Г2К; 4) базова олива I-40A; 5) олива універсальна моторно–трансмісійна ЄМТ-8, 6) олива універсальна моторно–трансмісійна ПРОТЕК ЄМТ-8.

За результатами проведених експериментальних досліджень щодо визначення змащувальної дії олив різного складу та експлуатаційного призначення було встановлено, що в період пуску в парі тертя кінетика формування товщини мастильного шару залежить від швидкості кочення, при зростанні якої відбувається підвищення товщини мастильного шару в центральній зоні контакту як в умовах чистого кочення, так і кочення з проковзуванням. Таким чином, забезпечується перехід від граничного до еластогідродинамічного (ЕГД) режимів мащення. Визначальну роль відіграє кінематична в'язкість мастильного матеріалу, яка, в основному, залежить від базової основи олив та кількісного вмісту присадок. При виконанні аналізу щодо динаміки формування товщини мастильного шару модифікованою оливою ПРОТЕК ЄМТ-8, необхідно зазначити, що на відміну від експериментальних показників оливи ЄМТ-8, модифікована олива забезпечує більш ефективне та надійне мащення контактних поверхонь в дослідженому діапазоні швидкостей та навантаження за рахунок наявної у базовій основі оптимальної в'язкості, який забезпечує задовільну товщину мастильного шару. На ряду з цим необхідно зазначити, що ефективність мастильної дії олив

ПРОТЕК ЄМТ-8 та ЄМТ-8 мають певні відмінності від загальноприйнятих залежностей щодо кращого формування мастильним матеріалом розділяючого шару в контакті про що свідчать показники ефективного формування товщини мастильного шару моторними оливами TEMOL CLASSIC 15w40; M8Г2К; M10Г2К. Отримані результати можливо пояснити лише з позиції обраних пар тертя експериментальної установки сталь–скло.

Встановлено, що динаміка формування товщини мастильного шару в умовах чистого кочення залежить як від в'язкості базової основи мастильного матеріалу, в'язкісних присадок, так і від типу контактних поверхонь. В умовах кочення з проковзуванням процес формування мастильної плівки залежить від стійкості компонентів оливи до градієнту швидкості зсуву, який має тенденцію до постійного зростання.

За результатами експериментальних досліджень були виявлені закономірності кінетики зміни реологічних характеристик олив різного експлуатаційного призначення (табл. 1). Зафіксовано залежність коефіцієнта тертя та напруг зсуву мастильного шару при зростанні навантаження від 251,5МПа до 362,7МПа для різних олив, що досліджувалися.

Таблиця 1 – Триботехнічні показники мастильних матеріалів при напруцюванні.

Показники	Мастильні матеріали					
	M8Г2К	M10Г2К	TEMOL CLASSIC 15w40	I-40A	ПРОТЕК ЄМТ-8	ЄМТ-8
$V_{\Sigma\text{поч.}}$, м/с	0,045	0,08	0,07	0,11	0,06	0,1
$V_{\Sigma\text{ст.}}$, м/с	0,6	0,9	0,7	1,0	0,6	1,4
$\eta_{\text{еф. поч.}}$, Па·с	11,2	5,85	6,98	4,33	7,46	3,88
$\eta_{\text{еф. ст.}}$, Па·с	1,61	1,25	1,63	1,14	1,77	0,85
$\gamma_{\text{поч.}} \times 10^4 \text{с}^{-1}$	2,8	5,1	4,3	7,3	4,0	7,8
$\gamma_{\text{ст.}} \times 10^4 \text{с}^{-1}$	8,8	12,2	9,2	13,4	8,9	18,3
$\tau_{\text{поч.}}$, МПа	0,319	0,299	0,3	0,317	0,299	0,302
$\tau_{\text{ст.}}$, МПа	0,143	0,153	0,149	0,153	0,158	0,154
$f_{\text{поч.}}$	0,0019	0,00178	0,00179	0,00189	0,00168	0,0018
$f_{\text{ст.}}$	0,00085	0,00091	0,00092	0,00091	0,00087	0,00092

Де $V_{\Sigma\text{поч.}}$ – початкове значення сумарної швидкості кочення;

$V_{\Sigma\text{ст.}}$ – стале значення сумарної швидкості кочення;

$\eta_{\text{эф.пoch.}}$ – початкове значення ефективної в'язкості мастильного матеріалу;

$\eta_{\text{эф.ст.}}$ – стале значення ефективної в'язкості мастильного матеріалу;

$\gamma_{\text{пoch.}}$ – початкове значення градієнту швидкості зсуву;

$\gamma_{\text{ст.}}$ – стале значення градієнту швидкості зсуву;

$\tau_{\text{пoch.}}$ – початкове значення напруги зсуву мастильного матеріалу;

$\tau_{\text{ст.}}$ – стале значення напруги зсуву мастильного матеріалу;

$f_{\text{пoch.}}$ – початкове значення коефіцієнту тертя

$f_{\text{ст.}}$ – стале значення коефіцієнту тертя

На рисунку 5 і рисунку 6 представлені залежності коефіцієнту тертя f_T від швидкості кочення $V_{\text{коч}}$, що є аналогічними кінетиці зміни коефіцієнту тертя f_T від дійсної товщини мастильного шару h_d .

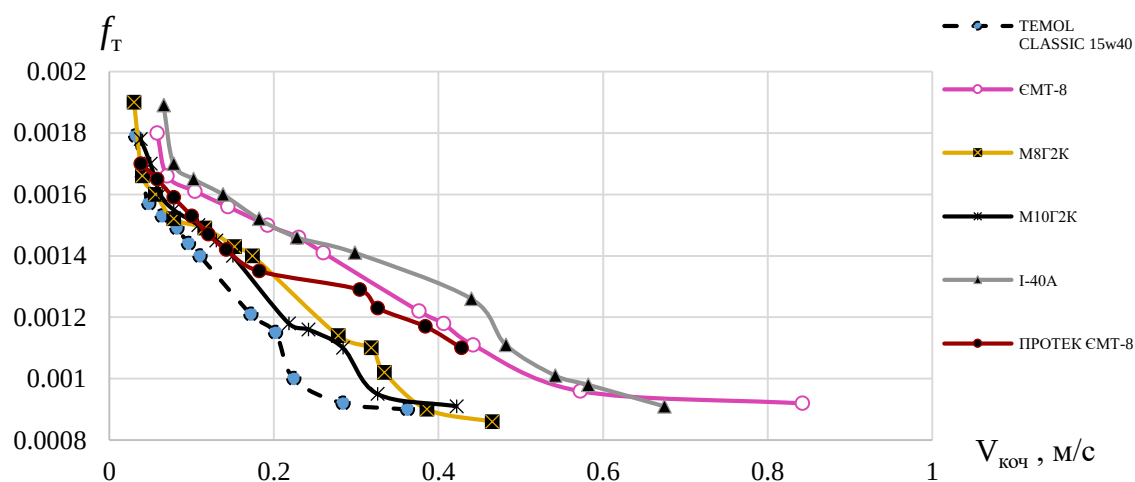


Рисунок 5 – Залежність коефіцієнту тертя f_T від швидкості кочення $V_{\text{коч}}$. ($\sigma_{\text{max}} = 251,5 \text{ МПа}$)

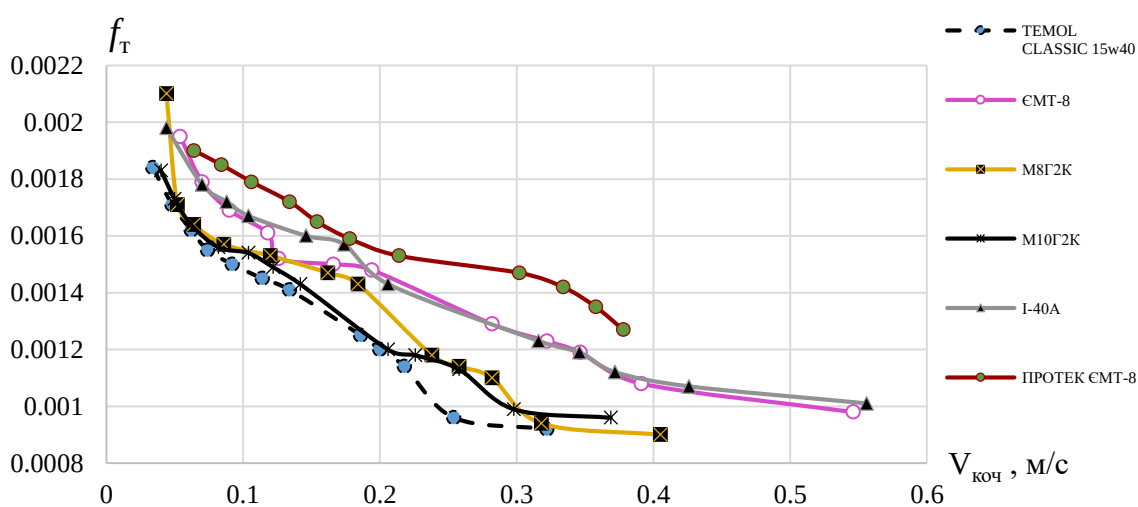


Рисунок 6 – Залежність коефіцієнту тертя f_T від швидкості кочення $V_{\text{коч}}$. ($\sigma_{\text{max}} = 362,7 \text{ МПа}$)

У четвертому розділі представлені результати досліджень щодо встановлення особливостей роботи трибомеханічних систем в умовах обмеженого мащення (за умови чистого кочення та кочення з проковзуванням) на динаміку процесу формування товщини мастильного шару в центральній зоні контакту для вищезазначених марок олив. Встановлено, що перехід від рясного до обмеженого режиму мащення призводить до запізнення у формуванні початкової товщини мастильного шару для всіх досліджених мастильних матеріалів, але зростання градієнту швидкості при напрацюванні в даних умовах обумовлює активацію та поляризацію молекул олив під дією твердої фази контактних поверхонь, за яких концентрація активованих молекул постійно зростає. Зафіксовано, що в при зміні режиму рясного мащення до обмеженого всі мастильні матеріали в початковий період формування мастильного шару характеризуються надбанням неньютонівських властивостей в контакті, що не враховується ЕГД ТМ. Саме про неньютонівські характеристики олив свідчить залежність ефективної в'язкості олив від градієнту швидкості зсуву, який в даному випадку зростає по мірі збільшення сумарної швидкості кочення. Зниження ефективної в'язкості $\eta_{\text{еф}}$ протягом експерименту для олив TEMOL CLASSIC 15w40, M8Г2К, M10Г2К, І- 40, ЄМТ-8 та ПРОТЕК ЄМТ-8 становить 73%: 76%: 70%: 72%, 80% та 68% відповідно, при цьому градієнт швидкості зсуву γ зростає в 1,92: 1,95: 1,76: 2,47: 2,67 та 2,07 рази (табл. 2).

Таблиця 2 – Динаміка триботехнічних характеристик мастильних матеріалів при напрацюванні

Показники	Мастильні матеріали					
	M8Г2К	M10Г2К	TEMOL CLASSIC 15w40	I-40A	ПРОТЕ К ЄМТ- 8	ЄМТ-8
$V_{\Sigma \text{поч.}}$, м/с	0,091	0,099	0,073	0,12	0,08	0,14
$V_{\Sigma \text{ст.}}$, м/с	0,68	0,67	0,54	1,14	0,6	1,46
$\eta_{\text{еф. поч.}}$, Па·с	5,54	4,68	6,41	6,10	5,79	3,42
$\eta_{\text{еф. ст.}}$, Па·с	1,34	1,42	1,71	1,74	1,83	0,68
$\gamma_{\text{поч.}} \times 10^4 \text{с}^{-1}$	5,7	6,4	4,6	7,4	5,1	8,8
$\gamma_{\text{ст.}} \times 10^4 \text{с}^{-1}$	11,2	11,23	9,0	18,3	10,5	23,5
$\tau_{\text{поч.}}$, МПа	0,32	0,299	0,3	0,45	0,293	0,30
$\tau_{\text{ст.}}$, МПа	0,143	0,153	0,15	0,30	0,192	0,15
$f_{\text{поч.}}$	0,00192	0,00179	0,0018	0,00191	0,0017	0,00183
$f_{\text{ст.}}$	0,00087	0,00095	0,00093	0,001	0,00088	0,00095

Де $V_{\Sigma \text{поч.}}$ – початкове значення сумарної швидкості кочення;

$V_{\Sigma \text{ст}}$ – стале значення сумарної швидкості кочення;
 $\eta_{\text{еф.пoch.}}$ – початкове значення ефективної в'язкості мастильного матеріалу;
 $\eta_{\text{еф. ст.}}$ – стале значення ефективної в'язкості мастильного матеріалу;
 $\gamma_{\text{пoch.}}$ – початкове значення градієнту швидкості зсуву;
 $\gamma_{\text{ст.}}$ – стале значення градієнту швидкості зсуву;
 $\tau_{\text{пoch.}}$ – початкове значення напруги зсуву мастильного матеріалу;
 $\tau_{\text{ст.}}$ – стале значення напруги зсуву мастильного матеріалу;
 $f_{\text{пoch.}}$ – початкове значення коефіцієнту тертя
 $f_{\text{ст.}}$ – стале значення коефіцієнту тертя

Зростання швидкості кочення обумовлює збільшення ефективності мащення, про що свідчить зростання товщини мастильного шару. При цьому ефективна в'язкість в контакті зменшується, що призводить як до зниження напруг зсуву мастильного шару, так і локалізації вектора напруг зсуву в товщині мастильного шару, де вплив твердої поверхні мінімальний.

В умовах зростання контактного навантаження з 251,5 до 362,7 МПа при початковому формуванні товщини мастильного шару встановлена кореляційна залежність коефіцієнта тертя та напруг зсуву мастильного шару для олів TEMOL CLASSIC 15w40, M8Г2К, M10Г2К, І-40, ЄМТ-8 та ПРОТЕК ЄМТ-8 – $f_{\text{т}}$ збільшується на 2,5% при зростанні напруги зсуву τ на 40%.

При зростанні швидкості кочення інтенсифікується початкове формування товщини мастильного шару в контакті (рис. 7), внаслідок чого забезпечується локалізація дотичних напруг зсуву в об'ємній фазі мастильного матеріалу та призводить до підвищення антифрикційних властивостей.

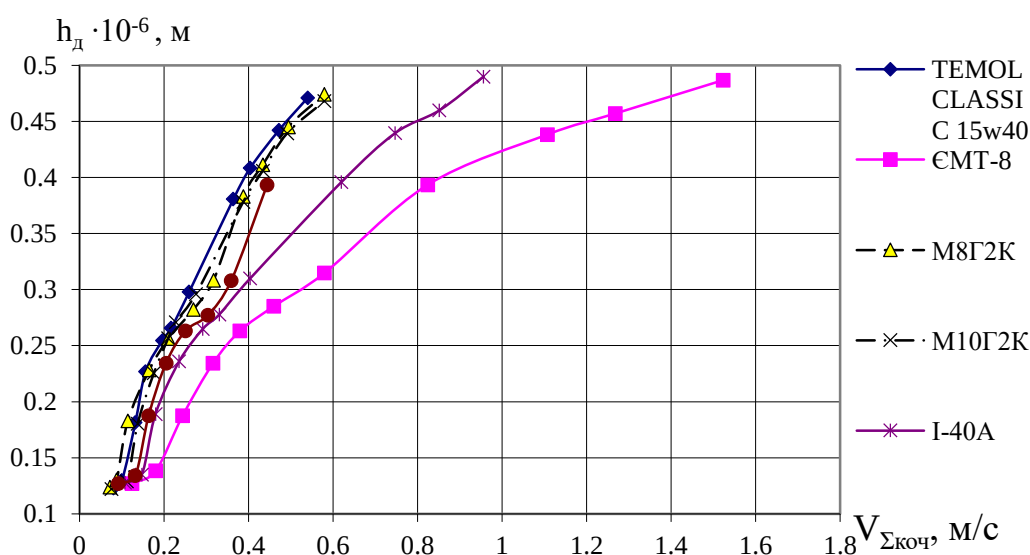


Рисунок 7 – Формування товщини мастильного шару h_d в контакті в умовах чистого кочення при зростанні швидкості $V_{\Sigma \text{коч}}$.

За результатами досліджень з'ясувалось, що проведення значної кількості дослідів є недоцільним, тому було прийнято рішення математично обробити ці результати.

В основу аналітичних моделей покладено визначення впливу механічних (коефіцієнт тертя – f_T) та фізичних (навантаження в точці контакту – N , температура – t) характеристик на дійсну товщину мастильного шару h_d .

В свою чергу, на величину коефіцієнту тертя впливає кількість обертів кульки (n), що дозволило також побудувати аналітичну модель на основі отриманих експериментальних даних.

Для отримання аналітичних моделей використано методи кореляційного і регресійного аналізу.

Процес розробки аналітичних моделей включає 2 основні етапи:

На I-му етапі було розроблено однофакторну модель для визначення залежності коефіцієнту тертя (f_T) від кількості обертів кульки (n), в результаті чого отримана поліноміальна модель(1).

$$f_T = \sum_{i=1}^k a_i \cdot n_i^i, \quad (1)$$

На основі проведеного розрахунку були отримані коефіцієнти рівняння регресії, який є поліномом п'ятого ступеню (2):

$$f_T = (227,1 - 9,2982 \cdot n + 0,445071 \cdot n^2 - 0,011312 \cdot n^3 + 0,000126978 \cdot n^4 - 0,000000532998 \cdot n^5) \cdot 10^{-5}, \quad (2)$$

Адекватність отриманої аналітичної моделі підтверджується критеріями Пірсона та Фішера.

При порівнянні емпіричного значення $f_{ЕМП} = 1,05961$ критерію Фішера з критичним значенням $f_{КР} = 1,607289$, визначеним по таблиці для числа ступенів свободи $df_1 = df_2 = 55$ і рівня значущості $\alpha = 0,05$, видно, що експериментально отримане значення $f_{ЕМП} < f_{КР}$, отже, гіпотеза про адекватність результатів, отриманих шляхом моделювання, результатам, отриманим шляхом натурних експериментів, підтверджується на 5% рівня значущості.

На II-му етапі розроблено регресійну багатфакторну модель (3) (з урахуванням експериментальних досліджень) для визначення залежності дійсної товщини h_d від навантаження – N , температури – t , та коефіцієнту тертя – f_T . В результаті було отримано аналітичну модель (поліном 2-го порядку).

$$h_d = f(N, f_T, t), \quad (3)$$

$$h_d = 0,0012 \cdot N - 609,058 \cdot f_T + 0,0667 \cdot t - 1,647 \cdot N \cdot f_T + 0,0002 \cdot N \cdot t - 0,3856 \cdot f_T \cdot t + 0,00017 \cdot N^2 + 55911,25 \cdot f_T^2 - 0,00073 \cdot t^2, \quad (4)$$

Адекватність якої підтверджується критерієм Фішера.

Розраховане значення критерію Фішера становило 2,28. Так як $f_{табл} = 2,69$ і $f_{розрах} < f_{табл}$, то підтверджується гіпотеза адекватності результатів експерименту побудованої моделі.

Дані моделі необхідні для аналітичного отримання значень дійсної товщини.

Далі візуально представлено динаміку зміни дійсної товщини в залежності від зміни навантаження та кількості обертів, а також в залежності від кількості обертів та температури для різних контактних навантажень (рис.8 та рис. 9)

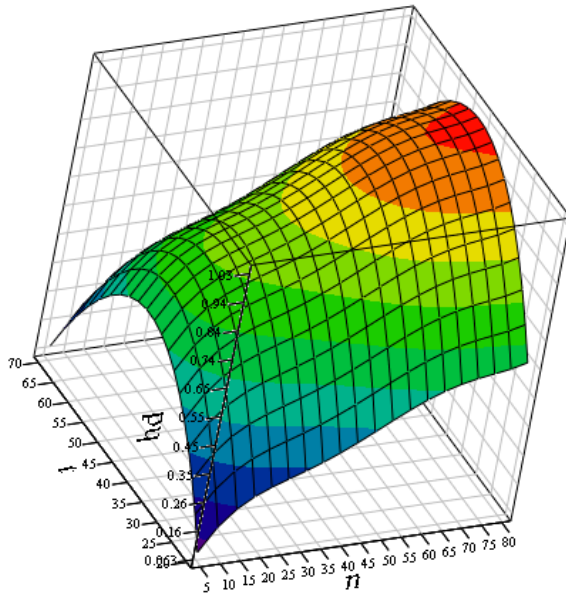


Рисунок 8 – Поверхні відгуку значень дійсної товщини в залежності від кількості обертів і температури при контактному навантаженні $N=11.25$ Н

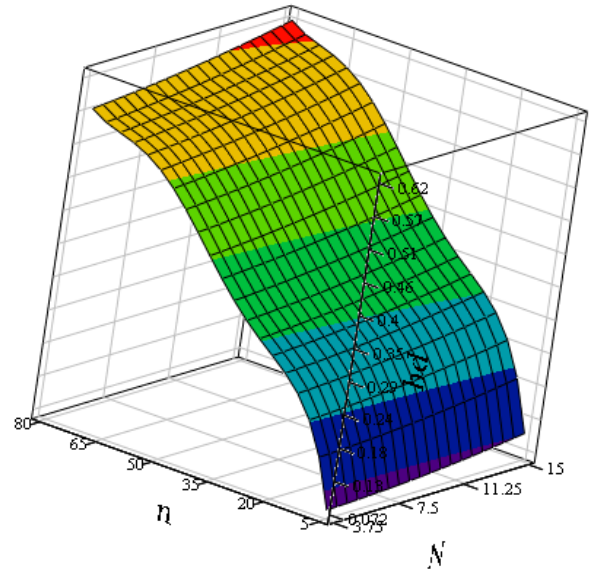


Рисунок 9 –Поверхні відгуку значень дійсної товщини в залежності від навантаження в точці контакту і кількості обертів при $t=70^{\circ}\text{C}$

Рисунки 8 та 9 показують, що при підвищенні кількості обертів дійсна товщина збільшується, хоча збільшення навантаження в точці контакту має слабку обернену залежність.

Створена аналітична модель ефективності мащення, дає змогу визначити ступінь впливу експлуатаційних чинників, і як наслідок, можливість прогнозувати довговічність неконформних вузлів тертя.

ВИСНОВКИ

У роботі вирішена важлива науково-прикладна задача щодо подовження ресурсу роботи трибомеханічних систем з локальною формою контакту за рахунок удосконалення їх триботехнічних характеристик шляхом оптимального підбору мастильних матеріалів та встановлення динаміки формування змащувальної плівки при рясному та обмеженому мащенні.

1. Модернізовано стенд оптичної інтерферометрії для вимірювання товщини мастильного шару та реологічних параметрів олив, що дало змогу максимально наблизити умови лабораторного дослідження до реальних умов експлуатації неконформних вузлів тертя.

2. Визначений кращий за протизношувальними та антифрикційними властивостями зразок зі складом I-40A+0,05% беззолного (Zn-Free) модифікатора тертя на основі фосфідно-сульфідних сполук, з метою виготовлення універсальної моторно-трансмісійної оливи ПРОТЕК ЄМТ-8.

3. В умовах чистого кочення при дослідженні динаміки формування товщини мастильного шару встановлено, що:

- формування товщини мастильного шару для всіх досліджених олив, як при рясному так і при обмеженому мащенні залежить від швидкості кочення – при зростанні якої відбувається підвищення товщини мастильного шару в центральній зоні контакту, що призводить до встановлення відповідних режимів мащення;

- ефективність змащувальної дії моторно-трансмісійних олив ЄМТ ПРОТЕК та ЄМТ-8 при рясному мащенні мають певні відмінності від загальноприйнятих залежностей щодо кращого формування мастильним матеріалом розділяючого шару в контакті, про що свідчать показники ефективнішого формування товщини мастильного шару моторними оливами TEMOL CLASSIC 15W-40; M8Г2К; M10Г2К;

- досліджені оливи при обмеженому мащенні характеризуються відставанням в формуванні початкової товщини мастильного шару, окрім оливи I-40A, для якої встановлено прискорення швидкості початкового формування товщини змащувального шару на 18% імовірно зі збільшенням кінетичної енергії молекул при зменшенні в'язкості;

4. Визначено, що при коченні за наявності проковзування в контакті властивості граничних плівок, залежать, як від в'язкості мастильного матеріалу, так і від наявності та ефективності поверхнево-активних речовин (ПАР). При рясному мащенні реалізуються сприятливі умови для зменшення початкової швидкості кочення зі встановленням змішаного режиму мащення при використанні мастильних матеріалів, які містять ПАР, що мають полярні молекули.

5. Встановлено, що за рахунок наявної у своєму фракційному складі оптимальної комбінації фосфідно-сульфідного аддукту олива ЄМТ ПРОТЕК-8 забезпечує динаміку ефективного та надійного мащення контактних поверхонь в дослідженому діапазоні швидкостей та навантаження, що на структурування граничних адсорбційних шарів впливають вуглеводневі компоненти базової основи. При цьому зростання напруги зсуву в контакті тертя обумовлено впливом деструкційно-полімеризаційних процесів, зростанням адгезійної та когезійної сил взаємодії компонентів оливи і контактних поверхонь пар тертя; зростанням градієнта швидкості зсуву при збільшенні швидкості кочення та контактного навантаження що залежить від кількісного впливу формування метастабільних ретикулярних шарів поліморфічного типу, які характеризуються додатковим опором зсуву.

6. Для всіх досліджених мастильних матеріалів як при рясному, так і при обмеженому мащенні, швидкість початкового формування товщини мастильного шару в контакті тертя зростає при зменшенні в'язкості

мастильного матеріалу, внаслідок зменшення кількості мастильного матеріалу на вході в контакт.

7. Кінетика зміни реологічних характеристик мастильних матеріалів в контакті: показана залежність ефективної в'язкості від градієнту швидкості зсуву, що свідчить про надбання оливами неньютонівських властивостей при початковому формуванні товщини мастильного шару, і не враховується в ЕГД ТМ. Для підтвердження даного трактування є фактична товщина мастильного шару, яка згідно досліджень в початковий період формування мастильної плівки, незалежно від типу оливи, на 7 – 11 % перевищує товщину мастильної плівки, яка розрахована за формулами Даусона та Хемрока. При рясному мащенні зниження ефективної в'язкості в контакті становить 72-86%; в умовах обмеженого мащення встановлено зниження ефективної в'язкості в контакті для всіх досліджених мастильних матеріалів на 70-80% при зростанні градієнта швидкості зсуву зростає в 1,7 - 2,7 рази.

8. Кінетика зміни антифрикційних властивостей мастильних матеріалів при різних режимах мащення: як в умовах рясного мащення так і при обмеженому мащенні при збільшенні контактного навантаження зростання напруги зсуву призводить до кореляційного збільшення коефіцієнту тертя для всіх досліджених мастильних матеріалів.

9. Збільшення градієнту швидкості зсуву внаслідок зростання швидкості ковзання призводить до видалення компонентів структурованих граничних шарів в об'ємну смектичну фазу, відбувається локалізація дотичних напруг зсуву, а це в свою чергу забезпечує в контакті умови для домінування гідродинамічного режиму мащення.

10. Створена аналітична модель ефективності мащення, що дає змогу визначити ступінь впливу експлуатаційних чинників, і як наслідок, можливість прогнозувати довговічність неконформних вузлів тертя з точковою формою контакту.

11. Результати теоретичних та експериментальних досліджень прийняті до впровадження у ТОВ «КСМ Протек» (смт. Клавдієво-Тарасове, Київська обл.) при виготовленні та оптимізації структурного складу мастильних матеріалів та філії КП «Київпаstrанс» Автобусний парк №6 (м. Київ) при прогнозуванні періодичності технічного обслуговування та заміни універсальних моторно-трансмісійних олив в агрегатах трансмісій гусеничної техніки та в навчальний процес Національного транспортного університету.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Публікації у виданнях, які входять до наукометричних баз

1. Дмитриченко М. Ф. Оценка состояния трансмиссионных масел по динамическим характеристикам трения. / Н. Ф. Дмитриченко, О. Н. Билякович, О. В. Руденко, А. А. Глухонец // Международный научный журнал журнал «ТРЕНИЕ И ИЗНОС»: Гомель ИММС НАН Беларуси 2016, Том 37, No 3, С. 374-378 (Scopus)

2. Дмитриченко М. Ф. Using Mathematical, Experimental and Statistical Modeling to Predict the Lubricant Layer Thickness in Tribosystems / M.

Dmytrychenko, V. Khrutba, A. Savchuk, A. Hlukhonets. Mathematical Modeling and Simulation of Systems/ Springer Nature Switzerland AG / 2019, P.39-49. (Scopus)

Публікації у наукових фахових виданнях України

3. Дмитриченко М. Ф. Дослідження кінетики зміни товщини мастильного шару в залежності від матеріалу пар тертя / Дмитриченко М. Ф., Білякович О. М., Глухонець А. О., Міняйло К. М. // Технологический аудит и резервы производства — № 6/6(26-), 2015. С. 39-41

4. Дмитриченко М. Ф. Динамика формирования толщины смазочного слоя в условиях локального контакта / Дмитриченко М.Ф., Білякович О.М., Глухонець А.О., // Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки». Науково-технічний збірник. – К.: НТУ, 2017. – Вип. 1 (37), С. 109-115

Публікації у наукових періодичних виданнях іноземних держав

5. Дмитриченко М. Ф. Моніторинг стану поверхневих шарів трибосполучень в умовах тривалої експлуатації мастильних матеріалів / Дмитриченко Микола, Білякович Олег, Савчук Анатолій, Міланенко Олександр, Туриця Юлія, Глухонець Андрій / Systemy i Srodki Transportu Samochodowego. Wybrane Zagadnienia : Monografia // pod redakcja naukowa Kazimierza Lejdy. – Seria Transport № 14. – Rzeszów: Politehnika Rzeszowska, 2015. – С. 227-232 ISBN 978-83-7934-007-1

Публікації апробаційного характеру

6. Дмитриченко М.Ф. Динаміка формування товщини мастильного шару в умовах точкового контакту / Дмитриченко М.Ф., Глухонець А.О., Богданова О.І., Глухонець О.О // Матеріали LXXI наукової конференції професорсько-викладацького складу аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету – К.: НТУ, 2015. – С.6

7. Дмитриченко Н.Ф. Эффективная вязкость смазочного материала в зоне контакта при масляном голодании / Дмитриченко Н.Ф., Глухонец А.А., Богданова О.И., Глухонец О.А. // Материалы 14-й Международной научно-технической конференции (69-й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных работников, докторантов и аспирантов БНТУ), Минск БНТУ, 2016 В 4 томах. Том 2, – С.100.

8. Богданова О.І. Ефективна в'язкість мастильного матеріалу в точковому контакті / Богданова О.І., Глухонець О.О., Глухонець А.О., Симоненко Б.А. // Матеріали LXXIII наукової конференції професорсько-викладацького складу аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету – К.: НТУ, 2017. – С. 12-13

9. Глухонец А.А. Влияние параметра скорости качения на кинетику формирования толщины смазочного слоя в условиях эластогидродинамического режима смазки/ Глухонец А.А. // Материалы 15-й Международной научно-технической конференции (70-й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных работников, докторантов и аспирантов БНТУ), Минск БНТУ, 2017 В 4 томах. Том 2, С. 98

10. Дмитриченко М.Ф. Математичне моделювання процесу зміни товщини мастильного шару в точковому контакті / Дмитриченко М.Ф., Глухонець А.О., Богданова О.І., Глухонець О.О., Бондарчук В.В. // Матеріали LXXIV наукової конференції професорсько-викладацького складу аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету – К.: НТУ, 2018. – С. 6-7

11. Дмитриченко М.Ф. Моделювання процесу зміни ширини змащувального шару у локальному контакті / Дмитриченко М.Ф., Савчук А.М., Глухонець А.О. Шевченко О.О. // III-я Всеукраїнська науково-практична конференція «Новітні шляхи створення, експлуатації, ремонту і сервісу автомобілів» – Миколаїв: ТОВ «МПРО», 2018. – С. 26-28

АНОТАЦІЯ

Глухонець А.О. Еластогідродинамічні аспекти мащення в умовах локальних контактів тертя. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертаційна робота на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.04 – «Тертя та зношування в машинах». – Національний транспортний університет, Київ, 2021.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню важливої науково-прикладної задачі щодо подовження ресурсу роботи трибомеханічних систем з локальною формою контакту за рахунок удосконалення їх триботехнічних характеристик шляхом оптимального підбору мастильних матеріалів та встановлення динаміки формування змащувальної плівки при рясному та обмеженому мащенні.

В роботі встановлено оптимальний вибір модифікаторів тертя для сучасних моторних олив, що змащують деталі двигунів класу Євро-5 та Євро-6.

Експериментальними дослідженнями було встановлено, що при зростанні швидкості кочення, для всіх досліджених мастильних матеріалів відбувається підвищення товщини мастильного шару в центральній зоні контакту, як в умовах чистого кочення так і кочення з проковзуванням, при рясному та обмеженому мащенні, тим самим забезпечується перехід від граничного до гідродинамічного режимів мащення.

Розроблені методи прогнозування довговічності неконформних вузлів тертя з точковою формою контакту на основі оцінки основних експлуатаційних чинників.

Створена аналітична модель ефективності мащення, яка дає змогу визначити ступінь впливу експлуатаційних чинників, і як наслідок, можливість прогнозувати довговічність неконформних вузлів тертя.

Ключові слова: триботехнічна система, еластогідродинаміка, неконформні вузли, локальний контакт, рясне мащення, обмежене мащення.

АНОТАЦИЯ

Глухонец А.А. Эластогидродинамические аспекты смазки в условиях локальных контактов трения. – Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.04 - «Трение и износ в машинах». - Национальный транспортный университет, Киев, 2021.

Диссертация посвящена решению важной научно-прикладной задачи по продлению ресурса работы трибомеханических систем с локальной формой контакта за счет совершенствования их триботехнических характеристик путем оптимального подбора смазочных материалов и установление динамики формирования смазочной пленки при обильном и ограниченном смазки.

В работе установлен лучший за противоизносными и антифрикционными свойствами образец с составом I-40A + 0,05% беззольного (Zn-Free) модификатора трения на основе фосфидно-сульфидных соединений, с целью изготовления универсальной моторно-трансмиссионного масла ПРОТЕК ЕМТ-8.

Установлено, что за счет имеющейся в своем фракционном составе оптимальной комбинации фосфидно-сульфидного аддукта масло ПРОТЕК ЕМТ-8 обеспечивает динамику эффективного и надежного смазывания контактных поверхностей в исследованном диапазоне скоростей и нагрузки, на структуризацию предельных адсорбционных слоев влияют углеводородные компоненты базовой основы.

Для всех исследованных смазочных материалов как при обильном, так и при ограниченном смазки, скорость начального формирования толщины смазочного слоя в контакте трения возрастает при уменьшении вязкости смазочного материала, вследствие уменьшения количества смазочного материала на входе в контакт.

Кинетика изменения реологических характеристик смазочных материалов в контакте: показана зависимость эффективной вязкости от градиента скорости сдвига, свидетельствует о приобретении маслами неньютоновских свойств при начальном формировании толщины смазочного слоя, и не учитывается в ЭГД ТС. При обильной смазке снижение эффективной вязкости в контакте составляет 72-86%; в условиях ограниченной смазки установлено снижение эффективной вязкости в контакте для всех исследованных смазочных материалов на 70-80% при росте градиента скорости сдвига в 1,7 - 2,7 раза.

Кинетика изменения антифрикционных свойств смазочных материалов при различных режимах смазки: как в условиях обильной смазке так и при ограниченной смазке при увеличении контактной нагрузки рост напряжения смещения приводит к корреляционному увеличению коэффициента трения для всех исследованных смазочных материалов.

Создана аналитическая модель эффективности смазки, которая позволяет определить степень влияния эксплуатационных факторов, и как следствие, возможность прогнозировать долговечность неконформных узлов трения с точечной формой контакта.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований приняты к внедрению в ООО «КСМ Протек» (пгт. Клавдиево-Тарасово, Киевская обл.) При изготовлении и оптимизации структурного состава смазочных материалов и филиала КП «Киевпастранс» Автобусный парк №6 (г. Киев) при прогнозировании периодичности технического обслуживания и замены универсальных моторно-трансмиссионных масел в агрегатах трансмиссий гусеничной техники, а также в учебный процесс Национального транспортного университета.

Ключевые слова: триботехническая система, эластогидродинамика, неконформные узлы, локальный контакт, обильная смазка, ограниченная смазка.

SUMMARY

Andrii Hlukhonets Elastohydrodynamic aspects of lubrication in conditions of local friction contacts – Qualifying scientific work as a manuscript.

Dissertation for the degree of candidate of technical sciences in the specialty 05.02.04 – "Friction and wears in machines". – National Transport University, Kyiv, 2021.

The dissertation is devoted to solving an important scientific and applied problem of extending the service life of tribomechanical systems with a local form of contact by improving their tribotechnical characteristics by optimal selection of lubricants and establishing the dynamics of lubricating layer formation with abundant and limited lubrication.

The optimal choice of friction modifiers for modern motor oils that lubricating engines details of the class EURO-5 and EURO-6 has been established.

Experimental researches have shown that with increasing rolling speed, for all investigated lubricants there is an increase in the thickness of the lubricating layer in the central contact zone, both in pure rolling and rolling with sliding, with abundant and limited lubrication, thus providing a transition from boundary to hydrodynamic lubrication regimes.

Methods for predicting the durability of non-conformal nodes friction with a point form of contact based on the assessment of the main operational factors have been developed.

An analytical model of the lubrication efficiency has been created, which makes it possible to determine the degree of influence of operating factors, and, as a consequence, the ability to predict the durability of non-conformal nodes friction.

Key words: tribotechnical system, elastohydrodynamics, non-conformal nodes friction, local contact, abundant lubrication, limited lubrication.