

**Кубіч В.І.,  
Марущак М.М.**

**Курликов Д.А.**

Запорізький національний технічний  
університет,

м. Запоріжжя, Україна

**E-mail:** schmirung@gmail.com,

**СТАН ТРИБОЛОГІЧНОЇ СИСТЕМИ «ШХ15-  
«МАСТИЛЬНЕ СЕРЕДОВИЩЕ» - ШХ15»  
ПІДШИПНИКА КОЧЕННЯ  
ПРИ СТУПІНЧАСТОМУ НАВАНТАЖЕННІ**

*УДК 621.891*

Наведено результати триботехнічних випробувань трибологічної системи матеріалів «ШХ15-«мастильне середовище» - ШХ15», яка досліджувалась у трибоз'єднанні «доріжка кочення – кулька – доріжка кочення» з використанням натурних підшипників кочення 305 та 304 при ступеневому навантаженні та швидкостях взаємодії поверхонь тертя 300, 500, 1000 хв<sup>-1</sup>. Встановлено неоднозначний вплив складу мастильних матеріалів на досягнення критичного значення коефіцієнта тертя кочення та визначені параметри швидко-навантажувального режиму, які наближають відповідну систему до руйнування мастильних утворень.

**Ключові слова:** трибоз'єднання, навантаження, натурний підшипник, коефіцієнт тертя, змащувальний матеріал.

**Вступ**

Одним з найважливіших факторів, що впливають на безвідмовну роботу підшипника, є його правильне змащування. Недостатня кількість або неправильно обраний змащувальний матеріал неминуче призводить до передчасного зносу підшипника і скорочення терміну його служби, або до аварійного виходу з ладу. В даний час до мастильних матеріалів пред'являються високі вимоги у зв'язку з підвищенням напруженості роботи вузлів тертя: високі частоти обертання, температура і навантаження, які діють на підшипник, що є найбільш значним чинником впливу на цілісність змащувального шару. Адаптивна система змащування на поперечному чи поздовжньому ухилі дороги навантаження на підшипник може зростати до двократного значення сил, діючих на підшипник при нормальних дорожніх умовах. Руйнування змащувального шару може викликати вихід пластичного матеріалу з зони кочення та підшипник почне працювати у режимі недостатнього змащування. Для вирішення науково-практичного завдання по забезпеченню постійних умов мащення поверхонь тертя підшипників кочення, наприклад, маточин коліс, необхідно володіти повною картиною робочих процесів, які при цьому відбуваються. Таку картину позначають закономірності зміни взаємодії тіл кочення – перехід від контакту через мастильні утворення, до контакту без них в залежності від параметрів швидко-навантажувального режиму роботи. Це, в першу чергу, визначить можливий експлуатаційний перехід роботи трибоз'єднань тіл кочення на режим мастильного голодування, і в другу чергу, обумовлять вихідні дані для розробки алгоритму автоматичного корегування примусовою подачею мастильного матеріалу.

**Аналіз публікацій та постановка мети досліджень**

В.А. Сидоров, А.Л. Сотников [1], акцентують увагу на тому, що підвищення довговічності підшипників полягає лише в закладанні довготривалого мастильного матеріалу. Також необхідно проводити перевірку наявності матеріалу в підшипнику не рідше 1 разу на 3 місяці для підтримки працездатного стану вузла. Зважаючи на складну конструкцію колісного редуктора, до складу якого входить маточина колеса, проведення цих робіт може бути занадто трудомістким для підприємства або приватних осіб, які володіють автопарком даних автомобілів. Також в цій області працює шведська компанія SKF [2], яка протягом декількох десятиріч займається питаннями підвищення надійності підшипникових вузлів шляхом виготовлення більш якісних змащувальних матеріалів та впровадження систем автоматичного змащування. Ця компанія займається й теоретичними дослідженнями надійності підшипників, внаслідок чого розробили свою розрахункову модель. Компанія «Челнидизель» [3] виробляє доопрацювання автомобілів КАМАЗ системами змащення фірми Lincoln GmbH (Німеччина). Дана система призначена для постачання вузлів тертя шасі автомобіля змазкою. Завдяки своїй високій адаптованості системи Lincoln можуть бути встановлені практично на всіх моделях і типах автомобільної техніки - автокранах, автобетонозамішувачах, сідельних тягачах, самоскидах та ін. Скорняков Е.С., Шматко Д.З., Авер'янов В.С., Коровкін А.А., у своїй науковій роботі [4,5], присвяченій неруйнівному контролю підшипників кочення, розглядають метод пік-чинника, який полягає у знятті показників звичайним віброметром та подальшою їх обробкою відповідним програмним забезпеченням. Але становити датчик безпосередньо на зовнішній обоймі підшипника практично неможливо, тому що сигнал вібрації характеризує не тільки підшипник, але й інші вузли механізму, що робить неможливим використання цієї системи на автомобілі, який рухається.

## Стан трибологічної системи «ШХ15-«мастильне середовище» - ШХ15» підшипника кочення при ступінчастому навантаженні

Але жоден з дослідників не враховує те, що при русі автомобіля по поверхням доріг з поперечним чи поздовжнім ухилом навантаження на маточини підшипника може значно збільшуватись. Саме це навантаження може бути рішучим фактором в процесі руйнування змащувального шару, що в наслідку зменшує надійність підшипника та вузла взагалі. В цілому, тематика досліджень є актуальною і спрямована на забезпечення високого рівня надійності елементів конструкції ходової частини автомобіля. Тому визначення впливу, насамперед радіального навантаження на руйнування мастильних утворень та перехід на сухе тертя при зміні швидкісного режиму взаємодії тіл кочення, є однією з задач, що вирішуються при розробці алгоритму управління змащуванням.

**Метою роботи** є загальна оцінка впливу мастильних утворень, які формуються з компонентів товарних консистентних та рідких (трансмійних) олив з різними основами базового середовища на загальний молекулярно-механічний стан комплексного трибоз'єднання «доріжка кочення – кулька – доріжка кочення». При цьому критерієм стану, який оцінюється, приймається закономірність зміни коефіцієнта тертя на стадіях взаємодії поверхонь з мастильним матеріалом і без нього в умовах імітації недостатнього змащування при ступінчастому навантаженні та фіксованих швидкостях кочення. Основним завданням даного дослідження ставиться загальна оцінка поведінки мастильних утворень в трибологічній системі матеріалів «ШХ15-«мастильне середовище» - ШХ15», що властиво експлуатаційній взаємодії елементів підшипників кочення маточин коліс.

### Методика проведення досліджень та їх обговорення

Проведення досліджень обумовлено можливістю встановлення додаткового оснащення на вал машини тертя СМЦ-2, яке дозволить встановити і обертати зразки підшипників кочення з частотами обертання 300, 500 і 1000 хв<sup>-1</sup>.

Для проведення триботехнічних випробувань використовувалися стандартні підшипники кочення № 305 і 304 (ДСТУ ГОСТ 8375: 2008).

У якості зразків мастильних матеріалів використовувалися сім товарних консистентних та рідких змащувальних середовищ, які входили у склад трибологічної системи:

- «ШХ15 - MOLDER MP2 - ШХ15»;
- «ШХ15 - Літол-24 - ШХ15» (Літол-24 по ГОСТ 21 150-87);
- «ШХ15 - ТАД-17- ШХ15» (ТАД-17 по ГОСТ 23652-79);
- «ШХ15 - ШРУС - ШХ15»;
- «ШХ15 - МТ-16П - ШХ15» (МТ-16П по ГОСТ 6360-83);
- «ШХ15 - MOTUL TECHGREASE 300 - ШХ15»;
- «ШХ15 - графітне мащення - ШХ15» (графітне мащення по ГОСТ 3333-80).

Зразки підшипників встановлювалися на привідний вал машини тертя СМЦ-2 за допомогою перехідної втулки. Втулка компенсувала різницю діаметральних розмірів між валом і внутрішньої обоймою підшипника. Від осевого зсуву підшипник фіксувався гайкою рис. 1.

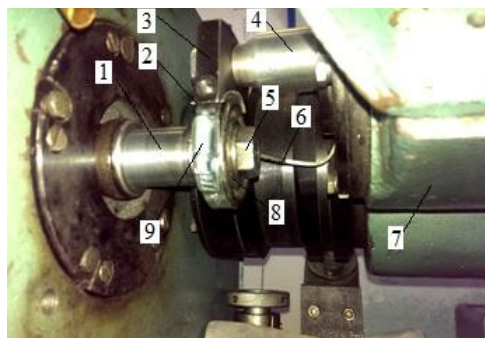


Рис. 1 - Обладнання для проведення триботехнічних досліджень :

- а - загальний вид: 1 - мультиметр; 2 - корпус машини тертя СМЦ-2; 3 - дріт термопар; 4 - каретка; 5 - вал каретки; 6 - натискний блок; 7 - підшипник кочення; 8 - вал машини тертя СМЦ-2; 9 - силовий гвинт;  
 б - натурний зразок: 1 - вал машини тертя; 2 - пластина фіксації контакту термопар; 3 - натискний блок; 4 - вал каретки; 5 - гайка; 6 - дріт термопар; 7 - каретка; 8 - підшипник кочення; 9 - хомут

Під час проведення дослідів фіксувалися наступні параметри: температура зразка, величина навантажувального зусилля, момент тертя. Для вимірювання температури зразків використовувався мультиметр ДТ-835 з термопарою ТР-01А з діапазоном вимірюваних температур від (-18) до 712°С. Для фіксації контакту

Стан трибологічної системи «ШХ15-«мастильне середовище» - ШХ15» підшипника кочення при ступінчастому навантаженні

термопари на зразку використовувався хомут. Величина навантажувального зусилля, що діяла на підшипники кочення під час дослідів, фіксувалася за допомогою динамометричною барабану машини тертя.

Коефіцієнт тертя розраховувався у відповідності з виразом (1) [6]. При цьому момент тертя вимірювався і фіксувався за допомогою потенціометра КСП2-005 у вигляді трибограм. Масштаб становив: довжина клітини сітки полю трибограм дорівнювала 1,2 мм - 0,18 Н·м.

$$k = \frac{M_{mp}}{A_{ш} \cdot P \cdot \left(1 + \frac{D}{d}\right)}, \quad (1)$$

де  $M_{mp}$  - момент тертя, Н·м;

$A_{ш}$  - коефіцієнт для кулькового підшипника,  $A_{ш} = 1,3$ ;

$P$  - сила навантаження, Н;

$D$  - зовнішній діаметр внутрішньої обойми підшипника, мм (для 305 – 32,02 мм; для 304 – 27,148 мм);

$d$  - діаметр тіла кочення, мм (для 305,304 – 7,94 мм).

Точність вимірювання становила  $\Delta_{M_{mp}} = 0,1$  мм, що в перерахунку на значення коефіцієнта тертя становило  $\Delta_f^1 = 0,003$  мм.

Триботехнічні дослідження проводились відповідно до розробленого циклу проведення випробувань. Для кожного змащувального матеріалу використовувався один підшипник кочення. Кількість повторів на одному підшипнику і одному зразку змащувального матеріалу становила три рази. Частоти обертання зразків підшипника під час повторів змінювалися на  $n_1 = 300$  хв<sup>-1</sup>;  $n_2 = 500$  хв<sup>-1</sup>;  $n_3 = 1000$  хв<sup>-1</sup>.

Цикл випробувань:

- встановлення підшипника кочення, наповненого змащувальним матеріалом; під'єднання контакту термопари до обойми підшипника; запуск машини; прописування «нульової» лінії протягом 2 хвилин з мінімальним навантаженням (частота обертання внутрішньої обойми  $n_1 = 300$  хв<sup>-1</sup>);

- підвищення навантаження з кроком 70 - 75 Н до величини 1209 Н з утриманням взаємодії протягом 30 секунд;

- зменшення навантаження до мінімального значення та прописування «нульової» лінії;

- зупинка машини тертя; огляд стану поверхонь підшипника; огляд стану змащувального матеріалу;

- повтор відповідних операцій при частотах обертання  $n_2 = 500$  хв<sup>-1</sup>,  $n_3 = 1000$  хв<sup>-1</sup> без додавання змащувального матеріалу.

Всі отримані дані для розрахункових коефіцієнтів тертя, в залежності від навантаження та часу випробувань, графічно відображались на полі координат. Загальний діапазон радіального навантаження становив від 164 Н до 1209 Н. За результатами обробки експериментальних даних побудованні графічні залежності, рис. 2-8. При цьому ділянки прописування «нульової» лінії не враховувались.

### Результати досліджень та їх обговорення

#### Випробування трибологічної системи «ШХ15 - MOLDER MP2 - ШХ15».

Випробування трибоз'єднання з консистентним змащувальним матеріалом MOLDER MP2 показали наступне, рис. 2. При  $n_1 = 300$  хв<sup>-1</sup> спостерігалось зниження коефіцієнта тертя від 0,13 до 0,02 мм протягом 3,5 хвилин, що відповідає припрацюванню мастильного матеріалу на поверхнях, рис. 2 а. Після цієї позначки мав місце сталий режим роботи, який не перетинається з кривою тертя без змащувального матеріалу. Це означає, що порушення змащувального шару відсутнє. При  $n_2 = 500$  хв<sup>-1</sup> присутнє перевищення коефіцієнта тертя вище позначки кривої сухого тертя, що характеризує процеси часткового або повного руйнування змащувального шару. Це явище відбулося через 7,5 хвилин після початку навантаження, коефіцієнт тертя склав 0,035 мм. За умов підвищення частоти обертання підшипника до  $n_3 = 1000$  хв<sup>-1</sup> спостерігалось зниження коефіцієнта тертя до позначки 0,04 мм протягом 5 хвилин, рис. 2 в. Після цієї позначки мав місце сталий режим роботи, який не перетинається з кривою тертя без змащувального матеріалу. Це означає, що порушення змащувального шару відсутнє. Загальний час дослідження становить при  $n_1$  – 7 хвилин, при  $n_2$  і  $n_3$  – 14 хвилин. Навантаження на підшипник для  $n_1$  і  $n_2$  знаходилися у діапазоні від 164 до 1209 Н і від 164 до 1060 Н для  $n_3$ .

#### Випробування трибологічної системи «ШХ15 - Літол-24 - ШХ15»

Випробування трибоз'єднання з консистентним змащувальним матеріалом Літол-24 показали наступне, рис. 3. На початку дослідження при  $n_1 = 300$  хв<sup>-1</sup> спостерігалось різке підвищення величини коефіцієнта тертя до позначки більше за 0,080 мм при допустимій величині 0,045 мм, рис. 3 а. Це пов'язано з припрацюванням мастильного матеріалу на початку контактної взаємодії непідготовлених поверхонь.

Стан трибологічної системи «ШХ15-«мастильне середовище» - ШХ15» підшипника кочення при ступінчастому навантаженні

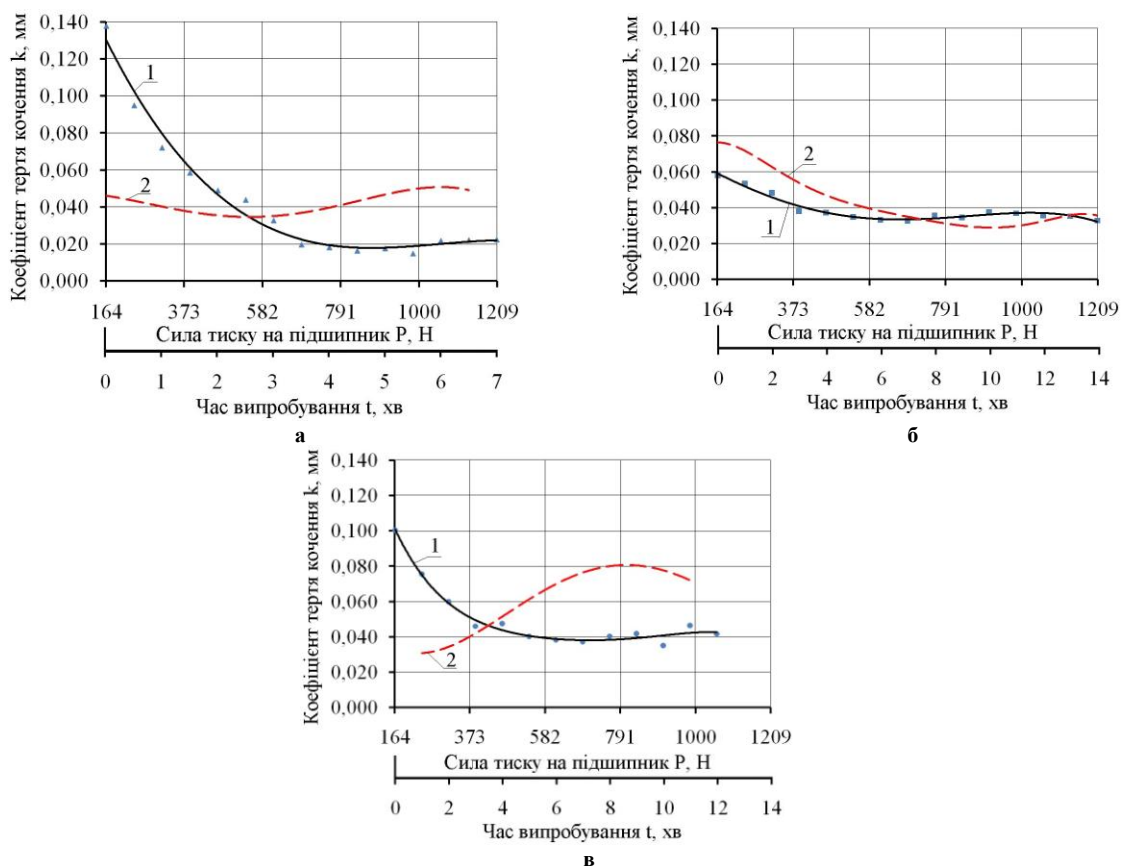


Рис. 2 - Графічні залежності зміни коефіцієнта тертя зі змащувальним матеріалом MOLDER MP2  
 1 - залежність коефіцієнта тертя від сили тиску зі змащувальним матеріалом;  
 2 - залежність коефіцієнта тертя від сили тиску без змащувального матеріалу;  
 а -  $300 \text{ хв}^{-1}$ ; б -  $500 \text{ хв}^{-1}$ ; в -  $1000 \text{ хв}^{-1}$

Досягнення сталого режиму тертя відбулося на 3,5 хвилині роботи. Далі мало місце зменшення коефіцієнта тертя до  $0,020 \text{ мм}$  при збільшенні навантаження за умов ефективного формування мастильних утворень. При збільшенні частоти обертання до  $n_2 = 500 \text{ хв}^{-1}$  спостерігалось зростання величини коефіцієнта тертя до позначки вище ніж  $0,03 \text{ мм}$  у діапазоні навантаження від  $790$  до  $900 \text{ Н}$ . Це може характеризувати порушення цілісності мастильних утворень і неможливість матеріалу чинити опір навантаженням. При збільшенні частоти обертання до  $n_3 = 1000 \text{ хв}^{-1}$  мало місце плавне збільшення величини коефіцієнта тертя зі збільшенням навантаження на підшипник, але різких зривів чи переходу позначки допустимого значення не відбувалося.

#### Випробування трибологічної системи «ШХ15 - ТАД-17- ШХ15»

Випробування трибоз'єднання з рідким мастильним матеріалом – трансмісійною оливою ТАД-17 показали наступне, рис. 4. На етапі приробітки при  $n_1 = 300 \text{ хв}^{-1}$  мастильний матеріал досягнув сталого режиму роботи на 3-й хвилині дослідження, рис. 4.а. При подальшому збільшенні навантаження значення коефіцієнта тертя коливалось в межах  $0,03 - 0,04 \text{ мм}$ , що вказує на відсутність порушення змащувального шару. При збільшенні частоти обертів до  $n_2 = 500 \text{ хв}^{-1}$  коефіцієнт тертя перевищив допустиме значення після 4-ї хвилини роботи при навантаженні  $400 - 500 \text{ Н}$  і знаходився в межах від  $0,04 - 0,05 \text{ мм}$ , рис. 4 б. Перевищення граничного значення тривало до припинення випробування. Це вказує на руйнування мастильних утворень. При  $n_3 = 1000 \text{ хв}^{-1}$  коефіцієнт тертя стало зростає від  $0,03 - 0,05 \text{ мм}$  протягом 8 хвилин, рис. 4 в. При подальшому збільшенні навантаження коефіцієнт тертя зменшився до  $0,02 \text{ мм}$ . Перевищення граничного значення при навантаженні  $300 - 400 \text{ Н}$  на початку випробування не мало критичного впливу на роботу трибологічної системи.

Стан трибологічної системи «ШХ15-«мастильне середовище» - ШХ15» підшипника кочення при ступінчастому навантаженні

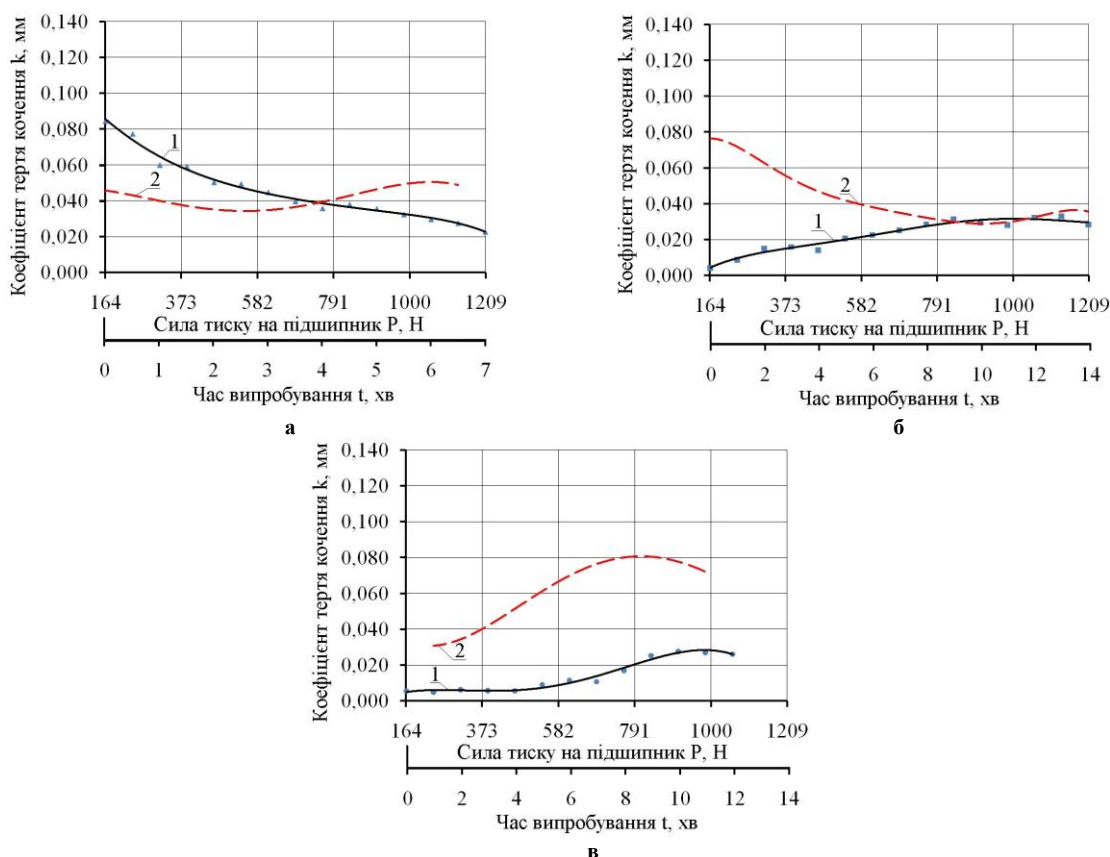
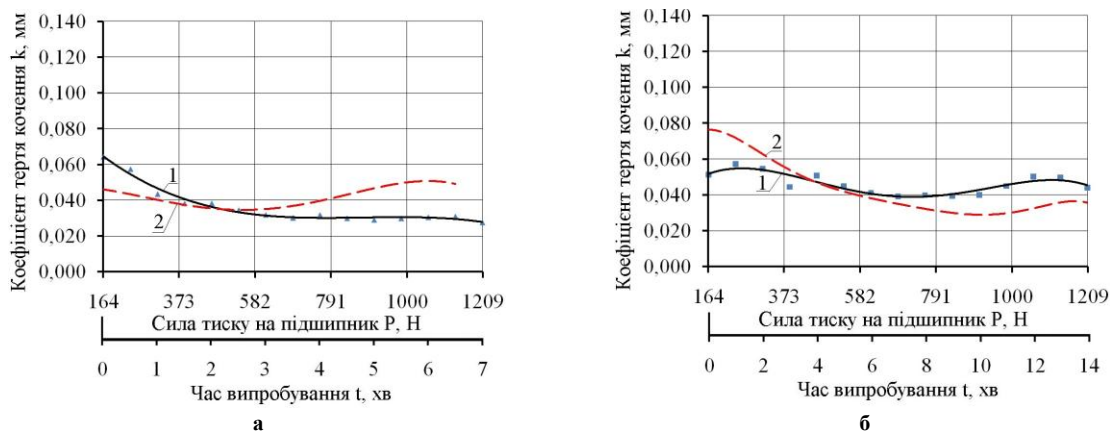


Рис. 3 - Графічні залежності зміни коефіцієнта тертя зі змащувальним матеріалом Літол-24  
 1 - залежність коефіцієнта тертя від сили тиску зі змащувальним матеріалом;  
 2 - залежність коефіцієнта тертя від сили тиску без змащувального матеріалу;  
 а -  $300 \text{ хв}^{-1}$ ; б -  $500 \text{ хв}^{-1}$ ; в -  $1000 \text{ хв}^{-1}$

**Випробування трибологічної системи «ШХ15 - ШРУС - ШХ15»**

Випробування трибоз'єднання з консистентним змащувальним матеріалом для «ШРУС» показали наступне, рис. 5. Під час випробування при  $n_1 = 300 \text{ хв}^{-1}$  спостерігалось плавне збільшення коефіцієнта тертя від 0,018 до 0,025 мм під час всього періоду проведення випробування. Перевищення граничного значення не відбувалося. При збільшенні частоти обертання до  $n_2 = 500 \text{ хв}^{-1}$  мало місце зростання коефіцієнта тертя від 0,01 до 0,03 мм до 10-ї хвилини роботи, після чого в діапазоні навантаження 850 – 1100 Н починалися можливі процеси руйнування змащувального шару. При  $n_3 = 1000 \text{ хв}^{-1}$  спостерігається різке зниження коефіцієнта тертя від 0,13 до 0,015 мм протягом 4-х хвилин.



Стан трибологічної системи «ШХ15-«мастильне середовище» - ШХ15» підшипника кочення при ступінчастому навантаженні

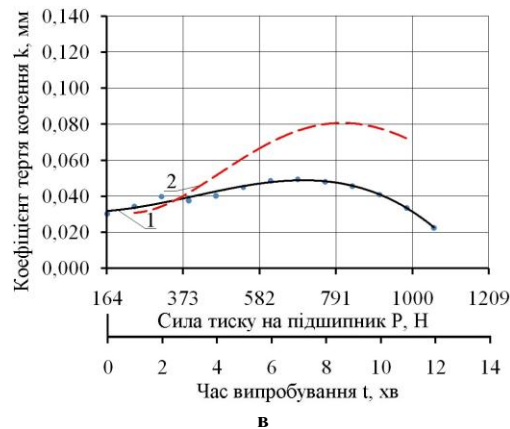


Рис. 4 - Графічні залежності зміни коефіцієнта тертя зі змащувальним матеріалом ТАД-17  
 1 - залежність коефіцієнта тертя від сили тиску зі змащувальним матеріалом;  
 2 - залежність коефіцієнта тертя від сили тиску без змащувального матеріалу;  
 а - 300 хв<sup>-1</sup>; б - 500 хв<sup>-1</sup>; в - 1000 хв<sup>-1</sup>

Далі крива є сталою та нагадує поведінку зразка №1 на рис. 2 в.

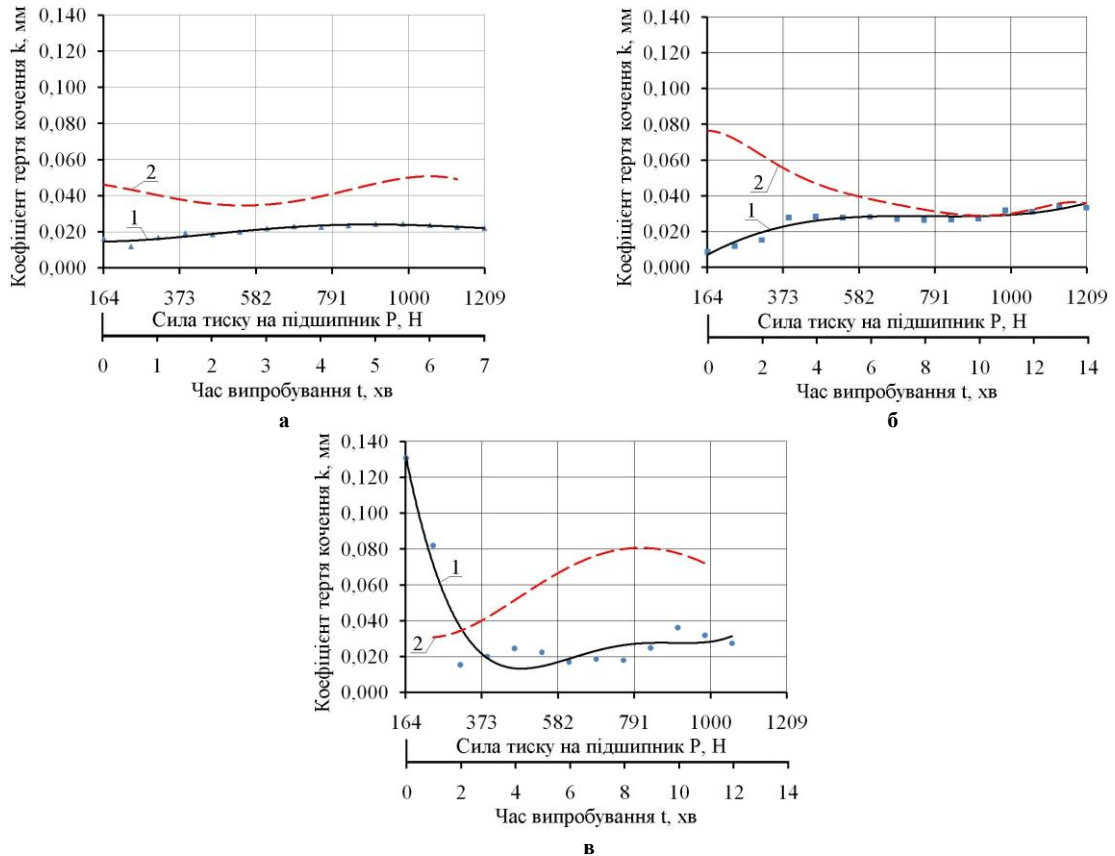


Рис. 5 - Графічні залежності зміни коефіцієнта тертя зі змащувальним матеріалом для «ШРУС»  
 1 - залежність коефіцієнта тертя від сили тиску зі змащувальним матеріалом;  
 2 - залежність коефіцієнта тертя від сили тиску без змащувального матеріалу;  
 а - 300 хв<sup>-1</sup>; б - 500 хв<sup>-1</sup>; в - 1000 хв<sup>-1</sup>

**Випробування трибологічної системи «ШХ15 - МТ-16П - ШХ15»**

Випробування трибоз'єднання з рідким мастильним матеріалом – трансмісійною оливою МТ-16П показали наступне, рис. 6. При  $n_1 = 300 \text{ хв}^{-1}$  спостерігалось зниження величини коефіцієнта тертя до позначки менше за 0,040, рис. 6 а. Це пов'язано з припрацюванням мастильного матеріалу на початку контактної взаємодії непідготовлених поверхонь.

Стан трибологічної системи «ШХ15-«мастильне середовище» - ШХ15» підшипника кочення при ступінчастому навантаженні

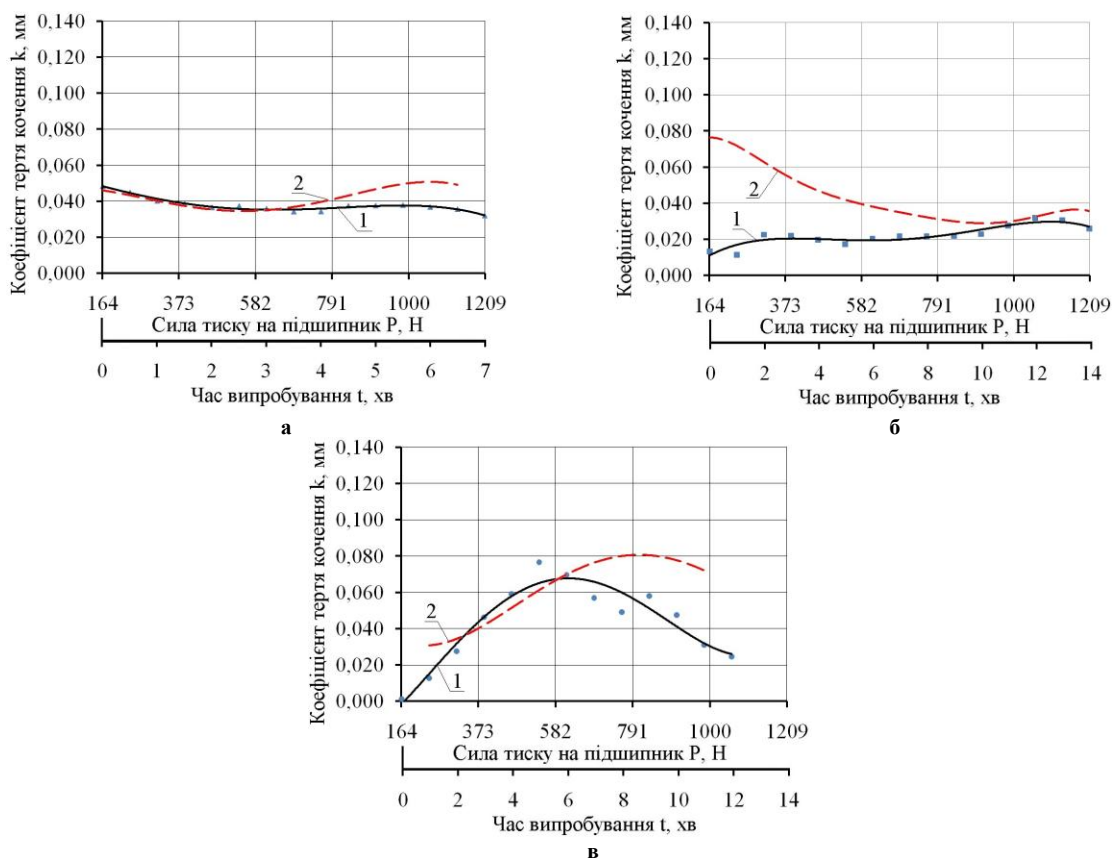


Рис. 6 - Графічні залежності зміни коефіцієнта тертя зі змащувальним матеріалом МТ-16П  
 1 - залежність коефіцієнта тертя від сили тиску зі змащувальним матеріалом;  
 2 - залежність коефіцієнта тертя від сили тиску без змащувального матеріалу;  
 а - 300 хв<sup>-1</sup>; б - 500 хв<sup>-1</sup>; в - 1000 хв<sup>-1</sup>

Досягнення сталого режиму тертя відбулось на 2-й хвилині роботи. Через майже однакове значення з кривою сухого тертя важко оцінити характер поведінки мастильного матеріалу в зоні контакту, враховуючи точність вимірювання. Далі при підвищенні частоти обертання до  $n_2 = 500 \text{ хв}^{-1}$ , рис. 6 б, спостерігався характер зміни коефіцієнта тертя як у досліді 2, рис. 3 в. При  $n_3 = 1000 \text{ хв}^{-1}$  мало місце різке підвищення коефіцієнта тертя до відмітки 0,07 мм в період перших шести хвилин роботи, після чого його значення знижується до 0,025 мм, рис. 6 в. Перевищення допустимого значення свідчить про руйнування мастильних утворень.

#### Випробування трибологічної системи «ШХ15 - MOTUL TECHGREASE 300 - ШХ15»

Випробування трибоз'єднання з консистентним змащувальним матеріалом MOTUL TECHGREASE 300 показали наступне, рис. 7. При  $n_1 = 300 \text{ хв}^{-1}$ , рис. 7 а, спостерігається поведінка кривої коефіцієнта тертя як у досліді 4, рис. 5 а, але з більшим діапазоном зміни значення, ніж у попереднього. При збільшенні частоти обертання до  $n_2 = 500 \text{ хв}^{-1}$ , рис. 7 б, поведінка кривої коефіцієнта тертя схожа з випробуванням 4, рис. 5 а. Далі при підвищенні частоти обертання до  $n_3 = 1000 \text{ хв}^{-1}$  перевищення допустимого значення коефіцієнту тертя спостерігається до 3-ї хвилини на відмітці 0,04 мм, рис. 7 в. Діапазон навантаження при цьому склав 350 – 400 Н. Після подальшого підвищення навантаження порушень змащувального шару не помічалось.

#### Випробування трибологічної системи «ШХ15 - графітне мащення - ШХ15»

Випробування трибоз'єднання з консистентним графітним мащенням показали наступне, рис. 8.

Під час дослідження при  $n_1 = 300 \text{ хв}^{-1}$  спостерігалось зниження коефіцієнта тертя протягом всього часу випробування від 0,045 до 0,03 мм, що може свідчити про тривалу приробітку, рис. 8 а. При  $n_2 = 500 \text{ хв}^{-1}$  після 7-ї хвилини роботи значення коефіцієнта тертя перетинає допустиме значення в діапазоні навантаження 650 – 750 Н, що характеризує можливість порушення змащувального шару, рис. 8 б. При збільшенні частоти обертання до  $n_3 = 1000 \text{ хв}^{-1}$  мало місце плавне збільшення величини коефіцієнта тертя зі

Стан трибологічної системи «ШХ15-«мастильне середовище» - ШХ15» підшипника кочення при ступінчастому навантаженні

збільшенням навантаження на підшипник, але різких зривів чи переходу позначки допустимого значення не відбувалося, рис. 8 в.

У цілому, отримані результати досліджень свідчать про наступне. Температурний стан взаємодії був таким, що відносна температура у всіх дослідах більш ніж 45-50 °С не піднімалась. При 300 хв<sup>-1</sup> всі випробувані матеріали не показували критичних збільшень величини коефіцієнта тертя протягом всього періоду роботи або під час сталого режиму тертя.

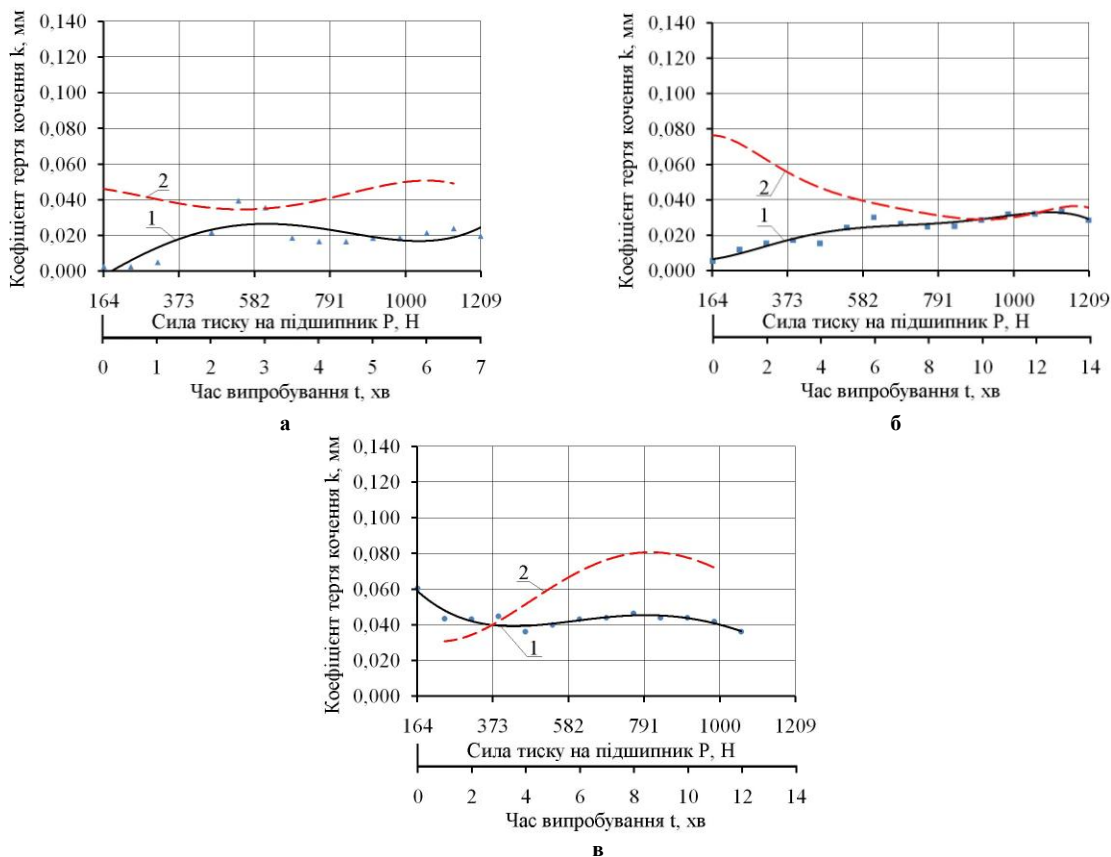


Рис. 7 - Графічні залежності зміни коефіцієнта тертя зі змащувальним матеріалом MOTUL TECHGREASE 300  
 1 - залежність коефіцієнта тертя від сили тиску зі змащувальним матеріалом;  
 2 - залежність коефіцієнта тертя від сили тиску без змащувального матеріалу;  
 а - 300 хв<sup>-1</sup>; б - 500 хв<sup>-1</sup>; в - 1000 хв<sup>-1</sup>

Перетини допустимого значення на початку випробування свідчить про приробітку контактних взаємодій непідготовлених поверхонь та утворені змащувальних шарів. Під час випробування при 500 хв<sup>-1</sup> трибосистема працювала на мастильних утвореннях, які були вже сформовані. Лише зразки ШРУС, MOTUL та МТ-16П показали роботу без перевищення допустимих значень, проте як MOLDER, Літол-24, ТАД-17 та графітний змащувальний матеріал мали характер можливого руйнування змащувального шару. При підвищенні частоти обертів до 1000 хв<sup>-1</sup>, Літол-24 та графітний змащувальний матеріал мають кращі показники залежності коефіцієнта тертя в порівнянні з іншими зразками. Слід відзначити, що зразки MOLDER, MOTUL та ШРУС на початку роботи мали перевищення допустимого значення, але при збільшенні навантаження коефіцієнт знижувався та не переходив межі кривої сухого тертя. З усіх зразків можна виділити змащувальний матеріал для ШРУСів, який показав стабільну роботу на всіх етапах випробування.

Стан трибологічної системи «ШХ15-«мастильне середовище» - ШХ15» підшипника кочення при ступінчастому навантаженні

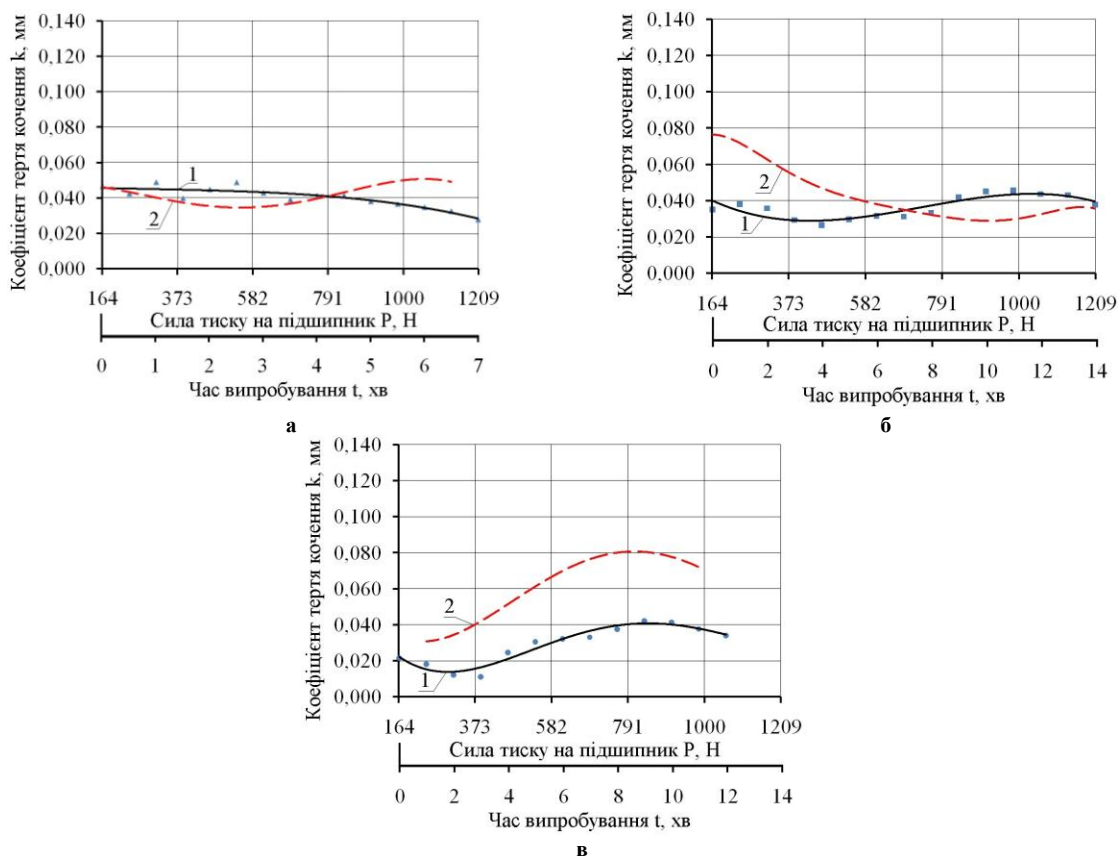


Рис. 8 - Графічні залежності зміни коефіцієнта тертя з графітним мащенням:  
 1 - залежність коефіцієнта тертя від сили тиску зі змащувальним матеріалом;  
 2 - залежність коефіцієнта тертя від сили тиску без змащувального матеріалу;  
 а -  $300 \text{ хв}^{-1}$ ; б -  $500 \text{ хв}^{-1}$ ; в -  $1000 \text{ хв}^{-1}$

## Висновки

В результаті проведених трибологічних випробувань отримані закономірності зміни коефіцієнта тертя в трибоз'єднанні «доріжка кочення кулька – доріжка кочення» для відповідних трибологічних систем матеріалів при ступінчастому навантаженні та фіксованих частотах обертання внутрішньої обійми натурного підшипника кочення. Основна увага приділена відстеженню часу, який визначав перевищення допустимого значення коефіцієнта тертя, та відповідних параметрів силової й швидкісної взаємодії. Отримані результати, з одного боку, представляються порівняно-узагальненими і вказують на неоднозначний характер поведінки досліджуваних мастильних матеріалів, і з іншого боку, є вихідними даними для визначення часу опору зриву мастильних утворень, які можуть бути покладені в основу алгоритму управління змащуванням. Встановлено, що найбільший опір зриву в розглянутих умовах надають мастильні утворення, які формуються із змащувального матеріалу для «ШРУС».

## Література

1. В. А. Сидоров, А. Л. Сотников. Эксплуатация подшипников качения [Электронный ресурс] : 2017. – 230 с. – Режим доступа: <https://www.litres.ru>.
2. Общий каталог SKF 2006 [Електронний ресурс] – Режим доступа: <http://galp.com.ua/supload/cms/Catalogs/Bearing/Podshipniki-Katalog-SKF-Ru-2006.pdf>.
3. Автоматическая централизованная система смазки грузового автомобиля Камаз-43118(6x6) "24 точки смазки"(кат. №636-45181-9) [Електронний ресурс] – Режим доступа: <https://www.remkam.ru/smazka43118/>.
4. Дослідження та аналіз експлуатаційних дефектів підшипників кочення залежно від застосування мастильних матеріалів / Дмитро Захарович Шматко, Едуард Сергійович Скорняков, Володимир Сергійович Авер'янов, Андрій Андрійович Коровкін // Вісник ТНТУ, – Т. : ТНТУ, 2016 – Том 83. – № 3. – С. 134–138. – (Машинобудування, автоматизація виробництва та процеси механічної обробки).

5. Скорняков Е. С. Експериментальні дослідження дефектів підшипників кочення на лабораторній установці методом співставлення діаграм та спектрограм / Е. С. Скорняков, Д. З. Шматко, В. С. Авер'янов, А. А. Коровкін // Перспективні технології та прилади. – 2016. – Вип. 8. – С. 103–109. – Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/ptp\\_2016\\_8\\_19](http://nbuv.gov.ua/UJRN/ptp_2016_8_19).

6. Справочник по триботехнике, Том 2, Смазочные материалы, техника смазки, опоры скольжения и качения / Под общ. ред. М. Хебды, А.В. Чичинадзе. – М. : Машиностроение, 1990. – 416 с.

Поступила в редакцію 14.11.2017

### Summary

V. I. Kubich, M.M. Marushchak, D.A. Kurlikov. **Condition of the tribological system "SHH15" - lubricating medium - "SHH15" rolling bearings with a stepped load**

The results of tribotechnical tests of the tribological system of materials "SHH15" - lubricating medium - "SHH15", which was investigated in the tribo connection "rolling path - ball - roller path" using the normal roller bearings 305 and 304 with the step load and speeds of the interaction of the friction surfaces 300, 500, 1000 min<sup>-1</sup>. In this case, the criterion of the state described is the regularity of the change in the coefficient of rolling friction in the stages of interaction of the surfaces with and without the lubricant material in the conditions of simulation of insufficient lubrication at a steady load and fixed rolling velocities. The study was conducted using SMC-2 friction machine with the use of additional equipment installed on the lower shaft in the form of a transition sleeve. As samples of lubricants, five product consistencies were used: MOLDER MP2; Litol-24; SHRUS; MOTUL TECHGREASE 300; graphite lubrication, and two liquid lubricating media: TAD-17; MT-16P. The main attention is paid to tracking the time, which determined the excess of the permissible value of the coefficient of friction, and the corresponding parameters of power and speed interaction. At 300 min<sup>-1</sup>, all tested materials did not indicate a critical increase in the friction coefficient during the entire period of operation or during steady state. During the test at 500 min<sup>-1</sup>, the tribosystem worked on lubricating formations that were already formed. Only the SHRUS, MOTUL, and MT-16P specimens showed the work without exceeding the permissible values, however, as MOLDER, Litol-24, TAD-17 and graphite lubricants had the character of possible destruction of the lubricant layer. With an increase in the speed of up to 1000 min<sup>-1</sup>, Litol-24 and graphite lubricant, the best indexes of the coefficient of friction are compared with other samples. It should be noted that the samples MOLDER, MOTUL and SHRUS at the beginning of work had an excess of the permissible value, but with increasing load, the coefficient declined and did not cross the limits of the dry friction curve. The obtained results, on the one hand, are relatively generalized and indicate the ambiguous nature of the behavior of the studied lubricants, and, on the other hand, are the starting data for determining the breakthrough time of the lubricating units, which can be used as the basis for the lubrication control algorithm in the rolling bearings. It has been established that the greatest resistance to failure in the conditions under consideration is provided by lubricating units formed from the SHRUS lubricant.

**Keywords:** tribounit, load, full bearing, coefficient of friction, lubricant.

### References

1. V. A. Sidorov, A. L. Sotnikov. Jekspluatacija podshipnikov kachenja [Elektronnij resurs] : 2017. – 230 s. – Rezhim dostupa: <https://www.litres.ru>.

2. Obshhij katalog SKF 2006 [Elektronnij resurs] – Rezhim dostupa: <http://galp.com.ua/supload/cms/Catalogs/Bearing/Podshipniki-Katalog-SKF-Ru-2006.pdf>.

3. Avtomaticheskaja centralizovannaja sistema smazki gruzovogo avtomobilja Kamaz-43118(6x6) "24 točki smazki" (kat. №636-45181-9) [Elektronnij resurs] – Rezhim dostupa: <https://www.remkam.ru/smazka43118/>.

4. Doslidzhennja ta analiz ekspluatacijnih defektiv pidshipnikov kochenja zalezno vid zastosuvannja mastil'nih materialiv / Dmitro Zaharovich Shmatko, Eduard Sergijovich Skornjakov, Volodimir Sergijovich Aver'janov, Andrij Andrijovich Korovkin // Visnik TNTU, – Т. : TNTU, 2016 – Том 83. – № 3. – С. 134–138. – (Mashinobuduvannja, avtomatizacija virobnictva ta procesi mehanichnoï obrobki).

5. Skornjakov E. S. Eksperimental'ni doslidzhennja defektiv pidshipnikov kochenja na laboratornij ustanovci metodom spivstavlennja diagram ta spektrogram / E. S. Skornjakov, D. Z. Shmatko, V. S. Aver'janov, A. A. Korovkin // Perspektivni tehnologii ta priladi. – 2016. – Vip. 8. – С. 103–109. – Rezhim dostupa: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/ptp\\_2016\\_8\\_19](http://nbuv.gov.ua/UJRN/ptp_2016_8_19).

6. Spravochnik po tribotehnike, Том 2, Смазочные материалы, техника смазки, опоры скольжения и качения / Под общ. ред. М. Хебды, А.В. Чичинадзе. – М. : Машиностроение, 1990. – 416 с.