

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ БАГАТОКОМПОНЕНТНОЇ БРОНЗИ В УМОВАХ ОБРОБЛЕНОЇ СИЛОВИМ ПОЛЕМ ГІДРАВЛІЧНОЇ ОЛИВИ

Онопрейчук Д. В., Стефанов В. О.

*Об'єктом дослідження є процес зміни зносостійкості бронзи в умовах електростатичного оброблення гідравлічної оливи. Зносостійкість бронзових елементів пар тертя визначає ресурс аксіально-плунжерних насосів і впливає на їх основні характеристики «подача – тиск».*

*Проведення досліджень базувались на теорії планування експериментів та статистичних методах обробки результатів випробувань. Методика досліджень передбачала моделювання процесу тертя ковзання за допомогою пари тертя «колодка – ролик» на машині тертя СМЦ-2 (країна виробник СРСР, модернізація Україна). Саме такий вид тертя має місце в трибосистемі «плунжер – блок циліндрів», «розподільний диск – блок циліндрів». Також методикою передбачалось попереднє оброблення гідравлічної оливи електростатичним полем в пристрої з подальшою подачею в ємність з роликом за допомогою насосної станції. Варіювались два незалежних фактори: напруженість електростатичного поля та напрацювання гідравлічної оливи. Незмінними факторами залишались швидкість потоку гідравлічної оливи в пристрої, температура гідравлічної оливи, тиск у контакті, лінійна швидкість ковзання ролика та час проведення кожного випробування.*

*Отриманні експериментальні дані дозволили встановити закономірність, що характеризує процес тертя ковзання за впливу на гідравлічну оливу силового поля. Дана закономірність розкриває вплив напруженості електростатичного поля та напрацювання гідравлічної оливи на зносостійкість бронзової колодки, що випробовувалась на машині тертя СМЦ-2. Це дало можливість визначити раціональні значення параметрів електростатичного поля, за яких досягається максимальна зносостійкість бронзи в залежності від напрацювання гідравлічної оливи, що знаходиться в межах від  $1 \cdot 10^6$  V/m до  $1,25 \cdot 10^6$  V/m. Так, вплив поля на оливу сприяє підвищенню зносостійкості бронзи до 5 разів за умов гідравлічної оливи в стані поставки та до 3 разів при оливі з часом напрацювання 2000 год. Вплив поля призводить до поляризаційних ефектів в оливі, які сприяють утворенню квазікристалічних плівок на поверхні тертя, збільшуючи зносостійкість трибосполучення.*

**Ключові слова:** гідравлічна олива, електростатичне поле, зносостійкість бронзи, трибосполучення, пара тертя, колодка-ролик.

### 1. Вступ

Широкого використання у виробництві гідравлічних машин набув такий конструкційний матеріал, як бронза. Зокрема, в поршневіх машинах (наприклад, в аксіально-плунжерних насосах) з неї (бронзи) виготовляють найбільш відповідальні елементи: опорні башмаки плунжерів, блоки гідроциліндрів. Саме ці елементи працюють в парах тертя «опорний башмак – плунжер», «плунжер – блок циліндрів», «розподільний диск – блок циліндрів», що є такими, які визначають ресурс аксіально-плунжерного насосу (АПН). Це пов'язано з тим, наприклад, що швидкість зносу пар тертя «плунжер – блок циліндрів» впливає на основні характеристики АПН, такі як «подача – тиск». Вони визначають об'ємний коефіцієнт корисної дії (ККД), який регламентує термін експлуатації насосу 15 % падінням від номінального значення. Отже, зменшення інтенсивності зносу вище перелічених пар тертя дає можливість підвищити строки служби даного типу насосів. Таке питання має декілька напрямків вирішення. Одним із них є запровадження нових підходів до проектування та конструювання через призму поглибленого дослідження та встановлення нових закономірностей в роботі елементів конструкції, де метою є підвищення ефективності роботи насосів [1, 2]. Другий напрямок передбачає нанесення додаткового шару антифрикційного

матеріалу на найбільш відповідальні елементи пар тертя насосу з метою підвищення їх зносостійкості [3–5]. Адже в таких трибосполученнях відбувається тертя між м'яким матеріалом бронзою та сталю. Саме швидкий знос деталей, виготовлених з бронзи визначає термін експлуатації всієї гідромашини. В порівнянні з попередніми напрямками, реалізація яких можлива лише на етапі конструювання, проектування та виготовлення АПН, наступний можна впровадити під час експлуатації насоса. Він полягає в покращенні трибологічних властивостей гідравлічних олиив шляхом додавання в них різного роду пакетів присадок [6, 7] або впливом зовнішніх силових полів [8]. З точки зору фізики процесу формування мастильної плівки на поверхнях тертя, пакети присадок не в повній мірі виконують своє функціональне призначення [9, 10]. Саме тому, доцільним та перспективним способом покращити формування мастильної плівки з поліпшеними антифрикційними властивостями є вплив на молекули присадок та базові молекули гідравлічної олиив зовнішніх силових полів [11–13]. До силових полів належать як магнітні, так і електростатичні, але з точки зору керування процесами тертя доцільнішим є використання електростатичного поля [12]. Таким чином, встановлення залежностей зносостійкості бронзи в часі, з якої виготовляють елементи пар тертя гідромашин від параметрів електростатичного поля є актуальним завданням. *Об'єктом дослідження* є процес зміни зносостійкості бронзи в умовах електростатичного оброблення гідравлічної олиив. *Метою дослідження* є встановлення закономірності зміни зносостійкості багатокомпонентної бронзи в умовах обробленої силовим полем гідравлічної олиив.

## 2. Методика проведення дослідження

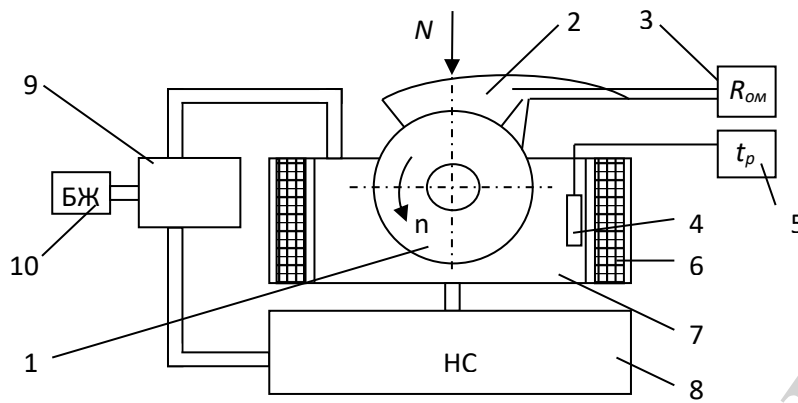
Зносостійкість пар тертя залежить від природи поверхонь тертя, гідравлічної олиив та її температури, режимів навантаження, відносні швидкості ковзання поверхонь та температура поверхонь тертя в місцях контакту. Пара тертя реалізує контакт поверхонь по площині. В зв'язку з цим випробування на знос проводилися на машині тертя СМЦ-2 (країна виробник СРСР, модернізація Україна), де в якості досліджуваного трибосполучення використовувалась пара тертя «колодка – ролик». Матеріали зразків (ролика та колодки) були підібрані відповідно до матеріалів, що використовуються в АПН 321.224. Матеріал колодки – багатокомпонентна бронза Бр.АЖ 9-4, а ролик – легована сталь 38Х2МЮА. Шорсткість поверхні колодки та ролика підбиралася на підставі конструкторської документації на зазначений насос, тим самим, забезпечувалася необхідна фактична площа контакту.

На рис. 1 зображена схема лабораторної установки для проведення випробувань на зносостійкість з використанням машини тертя.

Частота обертання ролика 1 і зусилля притиснення колодки 2 регулюються та підтримуються елементами керування машини тертя. Подача підготовленої гідравлічної олиив зі швидкістю 6 м/с здійснюється за допомогою насосної станції 8 через пристрій оброблення олиив до пари тертя [14]. Напруженість поля оброблення олиив має доцільність в діапазоні  $0,5-1,5 \cdot 10^6$  В/м [14].

В дослідженнях використовувалась всесезонна загущена гідравлічна олиива, що відповідає ТУ 38-1-281-69. Олиива використовувалась як у стані поставки, так і з різним часом напруження, тому був необхідним контроль класу чистоти кожної з проб. Кількість і розподіл за розмірами механічних частинок, зважених у гідравлічній олииві, визначались фотометричним методом за допомогою аналізатора механічних домішок ФС-112М (країна виробник СРСР).

За результатами вимірювань, згідно ГОСТ 17216-2001 встановлювався клас чистоти проб гідравлічної олиив (табл. 1).



**Рис. 1.** Схема лабораторної установки для проведення випробувань на зносостійкість пари тертя «колодка – ролик» на машині тертя СМЦ-2:

1 – ролик; 2 – колодка; 3 – омметр ( $R_{om}$ ); 4 – термодатчик; 5 – терморегулятор ( $t_p$ ); 6 – нагрівальний елемент; 7 – ємність; 8 – насосна станція (НС); 9 – пристрій для оброблення гідравлічної оливи; 10 – блок живлення (БЖ);  $N$  – зовнішнє навантаження

**Таблиця 1**

Клас чистоти проб гідравлічної оливи, відібраних для проведення досліджень

| № проби | Напрацювання, год. | Клас чистоти, відповідно ГОСТ 17216-2001 |
|---------|--------------------|--|
| 1       | 0                  | 9  |
| 2       | 500                | 12                                       |
| 3       | 1000               | 13                                       |
| 4       | 1500               | 13                                       |
| 5       | 2000               | 15                                       |

При роботі аксіально-плунжерних насосів вид мащення сполучення «плунжер – гільза» періодично змінюється від гідродинамічного до граничного, і навпаки. Це пов'язано зі зміною лінійної швидкості плунжера від близько 10 до 0 м/с в мертвих точках та різким збільшенням контактних тисків близько 20 МПа (відбувається перехід до граничного мащення).

Точку переходу до режиму граничного мащення зразків визначали шляхом вимірювання електричного опору. Для цього після електричної ізоляції зразків від «землі», до них підключався омметр і при гідродинамічному мащенні опір рухомого контакту зразків мав значення більше 1 МОм. При переході до граничного – 0,2–1 Ом. У результаті комбінації контактних тисків і швидкостей, а також аналізу електричного опору змащеного контакту зразків були встановлені значення контактного тиску та швидкості, при яких має місце перехід від граничного мащення пари тертя в гідродинамічне.

Таким чином, були встановлені значення всіх незмінних факторів:

- швидкість потоку гідравлічної оливи в пристрої – 6 м/с;
- температура гідравлічної оливи в баку насосної станції – 70 °С;
- тиск у контакті – 8 МПа;
- лінійна швидкість ковзання ролика – 0,3 м/с.
- час проведення одного випробування,  $t=1$  година.

Базуючись на теорії планування експерименту та методів статистичної обробки результатів вимірювань було розроблено ортогональний план 2-х факторного експерименту (табл. 2).

**Таблиця 2**

Ортогональний план двох-факторного експерименту

| № з/п | Кодовані значення |                | Натуральні значення                   |  |
|-------|-------------------|----------------|---------------------------------------|--|
|       | X <sub>1</sub>    | X <sub>2</sub> | Напрацювання гідравлічної оливи, t, h | Напруженість електростатичного поля, E · 10 <sup>6</sup> V/m |
| 1     | 0                 | 1              | 1000                                  | 1,5  |
| 2     | 1                 | 0              | 2000                                  | 1  |
| 3     | -1                | -1             | 0                                     | 0,5  |
| 4     | -1                | 0              | 0                                     | 1  |
| 5     | 1                 | 1              | 2000                                  | 1,5  |
| 6     | 0                 | -1             | 1000                                  | 0,5  |
| 7     | 1                 | -1             | 2000                                  | 0,5  |
| 8     | -1                | 1              | 0                                     | 1,5  |
| 9     | 0                 | 0              | 1000                                  | 1  |

Зносостійкість колодки визначалась через перерахунок величини вагового зносу. Тобто за допомогою аналітичних ваг ВЛР-200 (країна виробник СРСР) з похибкою не більше 0,01 г оцінювалася втрата ваги колодки в процесі проведення випробувань, а потім перераховувалась за виразом:

$$Z = \frac{1}{V_Z},$$

де V<sub>Z</sub> – ваговий знос ролика за одну годину, mg/h.

### 3. Результати досліджень та обговорення

Результати експериментальних досліджень наведені в табл. 3.

**Таблиця 3**

Результати експериментальних досліджень визначення зносостійкості бронзової колодки від напруженості електростатичного поля та напрацювання гідравлічної оливи

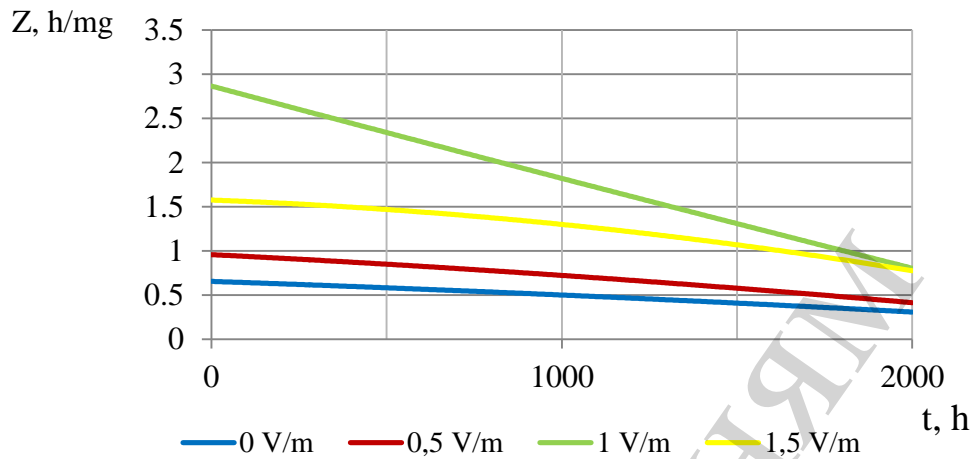
| № з/п                          | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Зносостійкість колодки Z, h/mg | 1,300 | 0,803 | 0,958 | 2,867 | 0,775 | 0,722 | 0,413 | 1,576 | 1,821 |

За результатами проведених досліджень отримано рівняння регресії, яке описує закономірність зносостійкості бронзової колодки пари тертя «колодка – ролик» в залежності від обраних факторів:

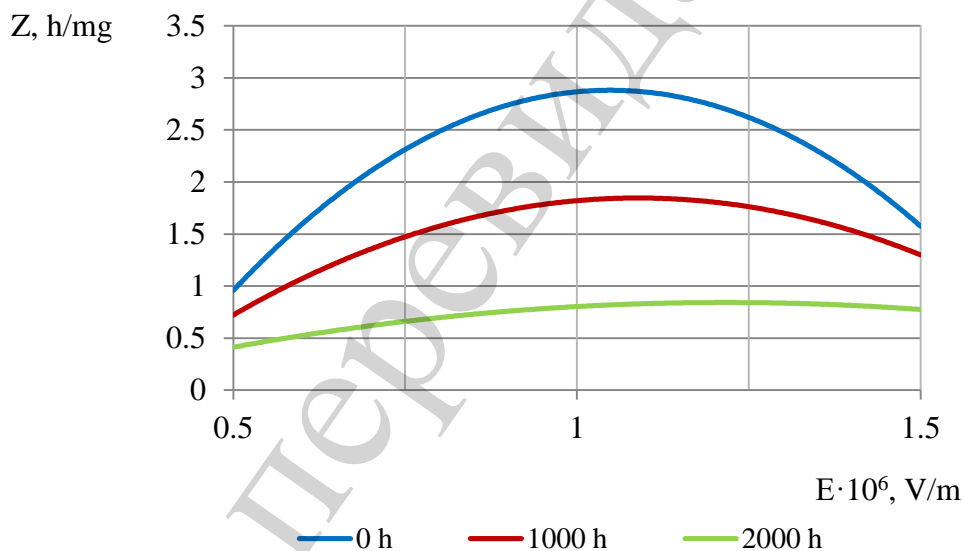
$$Z = 0,613 - 0,00081 \cdot t + 2,9272 \cdot E - 0,00000001 \cdot t^2 - 1,4012 \cdot E^2 - 0,00019 \cdot t \cdot E,$$

де t – час напрацювання гідравлічної оливи, год.; E – напруженість електростатичного поля.

Графічне зображення результатів випробувань впливу електростатичного оброблення гідравлічної оливи на зміну зносостійкості бронзової колодки пари тертя «колодка – ролик» при різному напрацюванні гідравлічної оливи на машині СМЦ-2 зображені на рис. 2 та рис. 3.



**Рис. 2.** Зміна зносостійкості бронзової колодки в залежності від часу напрацювання гідравлічної оливи за різних режимів оброблення



**Рис. 3.** Зміна зносостійкості бронзової колодки в залежності від напруженості електростатичного поля з різним часом напрацювання

Результати досліджень показують, що зі зростанням часу напрацювання гідравлічної оливи зносостійкість нелінійно спадає як для необробленої, так і для обробленої гідравлічної оливи, рис. 2. Для варіанту необробленої гідравлічної оливи зносостійкість зменшується з 0,65 h/mg. до 0,31 h/mg, тобто більш ніж в 2 рази за період роботи 2000 годин (рис. 2, синя крива). Для варіанту гідравлічної оливи, що оброблювалась електростатичним полем на зменшення зносостійкості в часі також впливає напруженість зовнішнього поля. Так, при напруженості зовнішнього поля, що дорівнює  $0,5 \cdot 10^6$  V/m зносостійкість зменшується в 2,3 рази за 2000 годин (рис. 2, червона крива). А при напруженості поля, що дорівнює  $1,5 \cdot 10^6$  V/m зносостійкість зменшується в 2 рази (рис. 2, жовта крива). В цілому порівняння кривих на рис. 2 говорить про те, що застосування електростатичного оброблення гідравлічної оливи підвищує зносостійкість бронзи до 5 разів за умови гідравлічної оливи в стані поставки і до 3 разів для рідини, що відпрацювала.

Стосовно результатів зміни зносостійкості бронзової колодки в залежності від напруженості електростатичного, то відповідно до рис. 3 для будь-якого часу напрацювання гідравлічної оливи зростання напруженості поля до якогось значення призводить до збільшення зносостійкості. А з подальшим збільшенням напруженості поля зносостійкість зменшується. Тобто функція зносостійкості від напруженості поля у всьому досліджуваному діапазоні має максимум, причому із зростанням часу напрацювання гідравлічної оливи такий максимум зсувається в область більших значень напруженості поля. Так, для гідравлічної оливи в стані поставки максимум функції має місце при напруженості  $1,05 \cdot 10^6$  V/m, а для гідравлічної оливи з часом напрацювання 2000 годин – при напруженості  $1,24 \cdot 10^6$  V/m.

Такі результати пов'язані з тим, що під дією електростатичного поля відбувається поляризація гідравлічної оливи. Молекули присадки за таких умов, завдяки постійному дипольному моменту, орієнтуються в напрямку напруженості поля, перебудовуючись в упорядковані мономери, димери та макродиполі. Молекули ж базової оливи, на відміну від молекул присадки, є неполярними діелектриками та під дією поля набувають дипольного моменту, що дозволяє їм взаємодіяти з молекулами присадки утворюючи додатково направлений шар за вектором напруженості поля. Це дозволяє, враховуючи фізичну конкурентну адсорбцію створити квазікристалічний шар на поверхні тертя. З напрацюванням гідравлічної оливи в об'ємі з'являються продукти зносу, які під дією електростатичного поля набувають навколо себе локальне поле, що перевищує зовнішнє. Це дозволяє адсорбуватись на поверхню продукту зносу молекулам присадки, утворюючи полімолекулярний шар. Керування такими надмолекулярними структурами потребує збільшення напруженості електростатичного поля, що пояснює зміщення максимуму функції зносостійкості в область більших значень напруженості поля (рис. 3). Надмолекулярні структури з продуктів зносу та молекул присадки під впливом зовнішнього поля заповнюють мікровпадини поверхні тертя, сприяючи збільшенню фактичної площі контакту та утворенню граничного шару. Це призводить до рівномірного розподілу зовнішнього навантаження і, як наслідок, зменшення питомого тиску, а значить збільшенню зносостійкості бронзової колодки.

#### 4. Висновки

Експериментальними дослідженнями встановлено, що оброблення гідравлічної оливи електростатичним полем сприяє підвищенню зносостійкості бронзи. Так, за умов роботи гідравлічної оливи в стані поставки зносостійкість бронзи збільшується до 5 разів, а при оливі з часом напрацювання 2000 год – до 3 разів. Також було встановлено закономірність зміни зносостійкості бронзової колодки від напруженості електростатичного поля, що впливає на гідравлічну оливу та напрацювання гідравлічної оливи. Це дало можливість визначити раціональні значення параметрів електростатичного поля, за яких досягається максимальна зносостійкість бронзи в залежності від напрацювання гідравлічної оливи, що становить від  $1 \cdot 10^6$  V/m до  $1,25 \cdot 10^6$  V/m.

#### References

1. Bergada, J., Sushil, K., Watton, J. (2012). *Axial Piston Pumps, New Trends and Development*. Published by Nova Science USA.
2. Hong, Y. S. (2012). Investigation into design problems of hydrostatic slipper bearings for variable speed axial piston pumps. *Journal of The Korean Society for Fluid Power & Construction Equipments*, 9.
3. Hong, Y.-S., Lee, S.-Y. (2008). A Comparative Study of Cr-X-N (X=Zr, Si) Coatings for the Improvement of the Low-Speed Torque Efficiency of a Hydraulic Piston Pump. *Metals and Materials International*, 14 (1), 33–40. doi: <http://doi.org/10.3365/met.mat.2008.02.033>
4. Hong, Y. S., Kim, J. H., Lee, S. L. (2014). Performance Improvement of a Swash Plate Type Piston Pump in the Low-Speed Range by a DLC Coating. *Journal of The Korean Society for Fluid Power & Construction Equipments*, 11 (4), 25–31. doi: <http://doi.org/10.7839/ksfc.2014.11.4.025>

5. Dovbenko, M. N., Evdokimov, V. D. (2014). Development of unconventional ways to improve performance of the axial piston hydromachines taking into account repair abilities. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (7 (71)), 31–36. doi: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.27996>
6. Ermakov, S. F. (2012). Effect of lubricants and additives on the tribological performance of solids. Part 2. Active friction control. *Journal of Friction and Wear*, 33 (3), 217–223. doi: <http://doi.org/10.3103/s106836661203004x>
7. Dmitrichenko, N. F., Milanenko, A. A., Savchuk, A. N., Bilyakovich, O. N., Turitsa, Y. A., Pavlovskiy, M. V., Artemuk, S. I. (2016). Improving the efficiency of lubricants by introducing friction modifiers for tracked vehicles under stationary conditions of friction. *Journal of Friction and Wear*, 37 (5), 441–447. doi: <http://doi.org/10.3103/s1068366616050044>
8. Mohamed, M. K., Alahmadi, A., Ali, W. Y., Abdel-Sattar, S. (2012). Effect of Magnetic Field on The Friction and Wear Displayed by The Scratch of Oil Lubricated Steel. *International Journal of Engineering & Technology*, 12 (6), 137–143.
9. Lysikov, Ye. M., Onopriichuk, D. V. (2010). Pidvyshchennia resursu tekhnichnykh system MVS Ukrainy shliakhom vykorystannia nanotekhnolohii. *Zbirnyk naukovykh prats Akademii vnutrishnikh viisk MVS Ukrainy*, 1 (15), 34–37.
10. Lysikov, Ye. M., Voronin, S. V., Stefanov, V. O. (2006). Balans PAR v robochykh ridynakh hidropriyvodiv budivelnnykh ta koliinykh mashyn. *Zbirnyk naukovykh prats UkrDAZT*, 73, 84–89.
11. Abeer, A. E., Abo Ainin, H. M., Khashaba, M. I., Ali, W. Y. (2011). Effect of Magnetic Field on Friction and Wear of Brass. *Journal of the Egyptian Society of Tribology*, 8 (2), 16–30.
12. Voronin, S. V., Dunaev, A. V. (2015). Effects of electric and magnetic fields on the behavior of oil additives. *Journal of Friction and Wear*, 36 (1), 33–39. doi: <http://doi.org/10.3103/s1068366615010158>
13. Simdyankin, A. A., Uspensky, I. A., Pashchenko, V. M., Starunsky, A. V. (2017). Ultrasonic machining of engine lubricating oil during tribotechnical testing. *Journal of Friction and Wear*, 38 (4), 311–315. doi: <http://doi.org/10.3103/s1068366617040134>
14. Onopreichuk, D. V. (2011). Vplyv napruzhennia elektrostatychnoho polia na tovshchynu mastylnoi plivky v hidropriyvodi pry hranychnomu terti. *Zbirnyk naukovykh prats UkrDAZT*, 122, 282–288.