

МЕХАНІЧНА ІНЖЕНЕРІЯ (131, 132, 133)

УДК 621.89

ВПЛИВ НАПРАЦЮВАННЯ ТА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ОБРОБКИ МАСТИЛЬНОГО МАТЕРІАЛУ НА ЗНОСОСТІЙКІСТЬ ПІДШИПНИКІВ КОВЗАННЯ

Д-р техн. наук С. В. Воронін, аспіранти О. С. Харківський, О. О. Губін

OPERATING TESTS OF THE DEVICE FOR ELECTROSTATIC ENGINE OIL TREATMENT

Dr. Sc. (Tech.) S. Voronin, postgraduate student O. Kharkivskiy, postgraduate student O. Hubin

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.205.2023.288790>



Анотація. У статті наведені матеріали експериментальних випробувань підшипників ковзання (дизельного двигуна Д-240) на зносостійкість і ресурс на машині тертя СМЦ-2. Випробування проведені для моторної оливи з різним напрацюванням у двигуні, від початкового стану свіжої оливи до повного напрацювання, що відповідає періодичності регламентної заміни. Також у випробуваннях частина зразків оливи підлягала попередній обробці зовнішнім електричним полем для інтенсифікації поверхневої активності присадок, що призводить до відповідного позитивного впливу на мастильну здатність оливи та зносостійкість елементів підшипників ковзання.

Ключові слова: дизельний двигун, підшипник ковзання, моторна олива, електрична обробка, напрацювання, зносостійкість, ресурс.

Abstract. The article presents the results of preliminary studies aimed at establishing the main factors affecting the service life of sliding bearings. The researchers pay special attention to the dominant types of lubrication, the thickness of the lubricating film, the load-bearing capacity of the film, shear resistance during friction, as well as the aging of the oil and the loss of its properties over time. Taking into account the previous achievements, as well as the works of the authors in the direction of increasing the wear resistance and resource of sliding bearings, it is proposed to test the sliding bearings of the D-240 diesel engine on the SMC-2 friction machine. The tests were performed according to the "pad - roller" scheme. In this diagram, the roller simulates the neck of the crankshaft, it is made of HF cast iron. The pad presses against the roller a fragment of the liner, which was made from a real engine liner and is a bimetallic element with a steel base and an anti-friction coating of AO-20-1 alloy. In the tests, the sliding friction of the liner fragment on the roller was modeled, and the load modes of the friction pair were set in such a way that mixed lubrication of the bearing or transitional lubrication from limit to hydrodynamic lubrication is achieved. The purpose of the tests was to establish the regularities of the impact of engine oil aging and its electrical processing on the wear resistance and service life of the bearing liners. For this, oil samples were taken from the engine lubrication system. Oil samples with 0, 150, 300 engine hours were tested. The complete experiment consisted of two series of trials. The first series of tests concerned the establishment of the effect of working on the wear resistance when lubricating the bearing with traditional oil taken from the engine. The second similar series of tests included the

additional introduction of electrical treatment of the oil samples before it was fed to the bearing model. The values of weight wear of liner fragments were obtained experimentally. The wear resistance and service life of the liners were calculated according to the corresponding dependencies, which are also given in the article. As a result of measurements and calculations, the regularities of the effect of working on the conditional life of the liners were obtained, taking into account the effect of the electrical treatment of the oil.

Keywords: *diesel engine, sliding bearing, engine oil, electrical processing, operating time, wear resistance, resource.*

Вступ. Підшипники ковзання (ПК) залишаються одною з розповсюджених груп рухомих опор у різних технічних системах. Надійність цих елементів залежить від багатьох факторів, до яких у першу чергу слід відносити конструкцію вузла, матеріали вкладишів і валів (осей), кінематику, зовнішні навантаження, трибологічні властивості мастильних матеріалів, температурні впливи.

Залежно від поєднання та рівня вказаних факторів будь-який підшипник ковзання характеризується власною навантаженістю, оцінюваною безрозмірним параметром Зоммерфельда або ж числом Герсі [1]. Значенням цього параметра відповідають втрати на тертя в підшипнику, що відбуваються за чотирьох можливих видів тертя і мащення: сухе тертя – граничне мащення – змішане мащення – рідинне мащення. Кожному виду притаманні власні значення коефіцієнта тертя, загальну закономірність якого відображує відома крива Герсі-Штрибека [1].

Найпоширенішою групою ПК є радіальні циліндричні підшипники, розраховані з умови забезпечення рідинного, частіше за все, гідродинамічного мащення. Найбільш напруженими серед цієї групи є ПК сучасних двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ). Вони, хоча й розраховуються на гідродинамічне мащення, суттєву частку часу працюють у змішаному або граничному мащенні, що обумовлено нестаціонарністю частоти обертів колінчастого вала, нерівномірністю розподілу тиску в області контакту, падінням в'язкості оливи на максимальних

температурах і з її напрацюванням у двигуні. Такі види мащення ПК призводять до зменшення їхньої зносостійкості, оскільки тертя відбувається за наявності надтонкої мастильної плівки, що призводить до підвищення інтенсивності зношування, переважно втомної та абразивної природи [2, 3].

Зазначені передумови свідчать про актуальність досліджень у напрямі підвищення зносостійкості ПК ДВЗ, причому найменш визначеним питанням, що сьогодні інтенсивно опрацьовується дослідниками в галузі машинобудування і трибології, є вплив характеристик оливи на зносостійкість. Ця невизначеність пов'язана, з одного боку, складністю фізико-хімічних процесів у зоні тертя при взаємодії оливи з поверхнями деталей, а з іншого боку, закритістю для фахівців-механіків передових технологій нафтопереробних компаній, що виготовляють оливи, особливо присадки до них [3]. У зв'язку з цим актуальними науково-практичними завданнями є пошук ефективних методів впливу на трибологічні властивості оливи, удосконалення методів прогнозування та випробування ПК при застосуванні оливи з модифікованими властивостями.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для усвідомлення актуальності підвищення зносостійкості ПК ДВЗ необхідно мати уявлення про розподіл втрат на тертя по елементах двигуна. Для цього скористаємося результатами дослідження [2], у якому встановлено, що втрати на тертя в ПК колінчастого вала ДВЗ сучасних автомобілів складають близько 25 % усіх втрат, що є дуже

суттєвим, особливо якщо врахувати достатньо низьку зносостійкість вкладишів цих ПК при роботі в змішаному або граничному мащенні. Для зменшення цих втрат на тертя сучасне машинобудування прагне зменшувати технологічний зазор, в'язкість оливи, товщину мастильної плівки, тобто зміщувати вид мащення з чистого гідродинамічного до еластогідродинамічного або змішаного відповідно до кривої Герсі-Штрибека [3]. Однак, за висновками цієї ж роботи, такі кроки без зміни трибологічних властивостей оливи призведуть до зменшення довговічності шийок колінчастих валів і вкладишів, оскільки зросте інтенсивність зношування.

До основних напрямів покращення трибологічних характеристик моторних олив можна віднести такі:

– зменшення кута нахилу в'язкісно-температурної характеристики оливи для забезпечення меншої в'язкості на холодному двигуні та більшої на гарячому [1, 3];

– забезпечення підвищеної товщини та несучої здатності граничної мастильної плівки при одночасному зменшенні опору зсуву плівки шляхом розроблення нових типів олив і присадок до них, а також впливу на ці оливи і присадки зовнішніми силовими полями [3-12].

Перший напрям достатньо вузький і детально опрацьований, наприклад для традиційних мінеральних олив він полягає в застосуванні в'язкісних присадок, а у випадку синтетичних олив – отримання температурно стабільних основ [1].

Другий напрям можна умовно поділити на три складові: застосування більш ефективних, але традиційних присадок до базових олив; застосування нетрадиційних олив і присадок; застосування зовнішніх силових полів для інтенсифікації мастильної здатності як традиційних, так і нетрадиційних олив.

Що стосується застосування більш ефективних, але традиційних за своєю дією

присадок, то йдеться про додавання оливо-розчинних поверхнево-активних речовин (ПАР) з підвищеною активністю до металу, наприклад шляхом збільшення дипольного моменту. Механізм дії таких присадок досить повно розкритий у минулому столітті, а результати робіт вчених різних країн світу відображені в монографії А. С. Ахматова [13].

До нетрадиційних олив відносять так звані електро- або магнітореологічні рідини, що являють собою суспензії полярних мікро- або наночастинок у неполярній рідині, які реагують на електричні та магнітні поля [4-9]. Результатом реакції на силові поля часто є підсилення властивостей граничної плівки на поверхнях тертя. Так, у роботі [4] встановлено збільшення в'язкості та товщини мастильної плівки електрореологічної рідини під дією електричного поля (ЕП). Аналогічні результати отримані в роботах [5-7], у тому числі для магнітореологічних рідин із застосуванням феромагнітних мікроскопічних частинок, у яких наведено підвищення несучої здатності мастильної плівки під дією відповідного силового поля. У роботі [8] наведені результати щодо збільшення несучої здатності рідкокристалічної граничної плівки під дією зовнішнього електричного поля, що корелюється з результатами роботи [10], де також досліджувався вплив ЕП на мастильну здатність олив. Досліджуються також іонні рідини для змащування трибологічних контактів, наприклад, в роботі [9] отримані цікаві результати з покращення трибологічних характеристик такої рідини при еластогідродинамічному мащенні неконформного контакту, який, на жаль, не можна віднести до ПК. Роботи [10-12] присвячені впливу ЕП на трибологічні властивості гідравлічних і моторних олив. Наприклад, робота [10] висвітлює деякі основні результати про позитивний вплив ЕП на мастильну здатність олив, а саме товщину граничної мастильної плівки,

втрати на тертя при граничному мащенні. Роботи [11,12] мають більш прикладний характер. Так, у роботі [11] наведені результати випробування мінеральної моторної оливи для тепловозного дизеля на машині тертя СМЦ-2 при застосуванні безперервної електричної обробки оливи при роботі двигуна. Робота [12] присвячена результатам випробування дизеля Д-240, оснащеного пристроєм для електричної обробки напівсинтетичної моторної оливи EXTRA DI 10W-40. У цій роботі отримано збільшення тиску оливи в головній магістралі, що лише опосередковано вказує на покращення мастильної здатності оливи та умов мащення ПК двигуна.

Перелічені роботи, їхня різноманітність свідчать про велику зацікавленість вчених щодо дослідження впливу силових полів як на традиційні, так й інші мастильні матеріали при змащенні ПК, при цьому експериментальна спрямованість цих робіт говорить про відсутність єдиних теоретичних основ такого впливу. Крім того, стосовно процесу мащення ПК ДВЗ залишаються невивченими питання впливу зовнішнього електричного поля на мастильну здатність напівсинтетичних і синтетичних олив, а також зміни зносостійкості ПК під впливом ЕП на мастильну здатність. Крім того, особливої уваги потребує вивчення впливу напрацювання моторної оливи у двигуні на можливість застосування її електричної обробки протягом строку служби оливи, оскільки її властивості суттєво змінюються. Так, у роботі [14] наведені результати розроблення методу діагностування ПК ДВЗ за аналізом спектра сигналів акустичної емісії. Також вказано на суттєвий вплив напрацювання оливи, що підтверджує необхідність урахування цього фактора.

Мета та завдання дослідження. Метою дослідження є визначення впливу напрацювання та режимів обробки моторної оливи зовнішнім ЕП під час

експлуатації на зносостійкість та умовний ресурс вкладишів колінчастого вала дизельного двигуна.

Матеріали, обладнання та методика дослідження. Для проведення випробувань обрані зразки напівсинтетичної моторної оливи EXTRA DI 10W-40 із різним терміном напрацювання в дизелі Д-240 колісного трактора МТЗ-82, оснащеного пристроєм для електричної обробки (ЕО) оливи перед її потраплянням до зони тертя. Періодичність відбору проб відповідала програмі експлуатаційних випробувань, результати яких наведені в роботі [12]. Напрацювання оливи складало 0, 150 і 300 мото-годин.

Об'єктом випробування на зносостійкість і ресурс є ПК колінчастого вала двигуна, а саме біметалевий шатунний вкладиш зі сталеною основою, вкритою сплавом АО-20-1, що працює в умовах тертя ковзання в парі з шийкою, яка виготовляється з чавуну ВЧ.

Моделювання умов тертя і змащування випробуваного ПК проводилося на машині тертя СМЦ-2 за схемою «колодка – ролик», наведеною на рис. 1.

На рис. 1 позицією 2 вказано фрагмент вкладиша – сегмент діаметром 65 мм, кут охоплення 36° , ширина 10 мм. Позиція 3 рис. 1 відповідає фрагменту шийки – ролик діаметром 65 мм, шириною 12 мм.

Режими навантаження ПК підбирали за цільовим змішаним режимом мащення, що встановлювався в точці переходу від граничного мащення до гідродинамічного. Відповідно до попередніх налаштувальних вимірювань обрані такі режими:

- нормальне навантаження $N = 1680 \text{ Н}$;
- тиск у контакті $p = 8 \text{ МПа}$;
- частота обертів $n = 16,67 \text{ с}^{-1}$;
- швидкість ковзання $v = 3,4 \text{ м/с}$ (початок переходу в ГД мащення);
- час одного випробування – 40 год;
- температура оливи $T = 90 \text{ }^\circ\text{C}$.

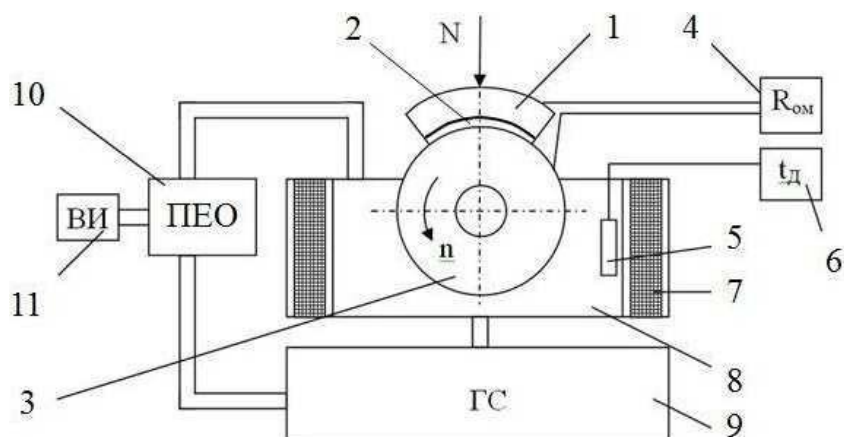


Рис. 1. Схема випробування ПК на машині тертя:

- 1 – колодка; 2 – фрагмент вкладиша; 3 – ролик; 4 – омметр; 5 – термодатчик;
6 – терморегулятор; 7 – нагрівач; 8 – стакан; 9 – гідростанція;
10 – лабораторний пристрій ЕО; 11 – високовольтне джерело

Експеримент включав дві паралельних серії випробувань ПК на зносостійкість: серія 1 – ПК зі змащенням оливою без ЕО при напрацюванні 0, 150, 300 мото-годин; серія 2 – ПК зі змащенням оливою, що підлягає обробці ЕП при такому самому напрацюванні.

У кожному окремому випробуванні вимірювався ваговий знос фрагмента вкладиша Δm за методикою статті [11], після чого за отриманими даними виконували перерахунок його інтенсивності лінійного зношування за формулою

$$I_h = \frac{\Delta m}{14400\pi^2 d^2 b \rho n}, \quad (1)$$

де d – діаметр вкладиша;
 b – ширина вкладиша;
 ρ – щільність антифрикційного сплаву;
 n – частота обертів.

Після цього розраховували умовний ресурс вкладиша за формулою

$$T = \frac{U_{гр}}{3600\pi d I_h n}, \quad (2)$$

де $U_{гр}$ – граничний знос антифрикційного шару, що складає 0,2 мм.

Отже, для обох серій випробувань отримано таку емпіричну функцію:

$$T = f(t), \quad (3)$$

де t – напрацювання оливи.

Результати дослідження та їх обговорення. Результати випробувань зведені в таблицю, де зношена маса вкладиша отримана експериментально.

За розрахунковими даними отримані рівняння регресії, що відображують закономірність зміни умовного ресурсу вкладиша від напрацювання за відсутності або наявності ЕО оливи.

Для оливи без ЕО

$$T = 1530t^{-0.901}, \quad (4)$$

а оливи з ЕО

$$T = 2750t^{-1.223}. \quad (5)$$

Адекватність обох рівнянь перевірялася за критерієм Фішера.

За отриманими рівняннями побудовані графіки залежності умовного ресурсу вкладиша від напрацювання та ЕО (рис. 2).

Результати випробувань і розрахунків

Показник	Формула розрахунку	Олива без ЕО при напрацюванні			Олива з ЕО при напрацюванні		
		0	150	300	0	150	300
Δm , мг	дані експерименту	3,4	6,5	9,1	1,9	4,5	7,2
$I_h \times 10^{-11}$	залежність (1)	1,06	2,03	2,84	0,59	1,41	2,25
T , мото-годин	залежність (2)	1540	804	575	2767	1158	725

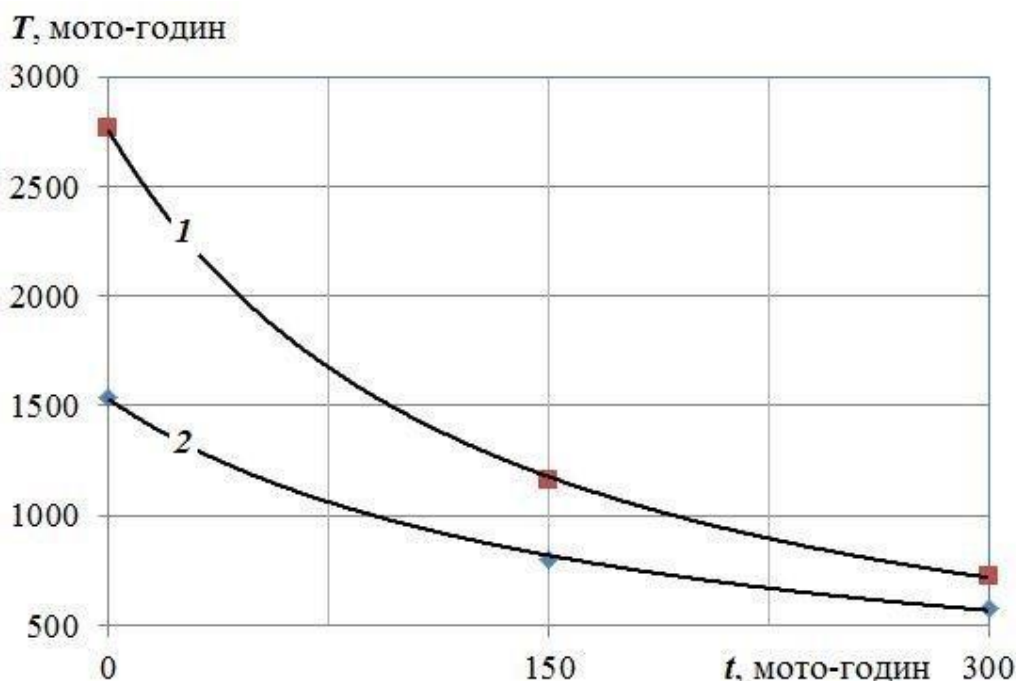


Рис. 2. Залежність умовного ресурсу вкладиша від напрацювання:
1 – з ЕО; 2 – без ЕО

За графіками на рис. 2, напрацювання оливи суттєво впливає на ресурс вкладишів. Так, при погіршенні властивостей оливи протягом повного строку напрацювання (300 мото-годин) інтенсивність зношування та умовний ресурс зменшується нелінійно майже в три рази для обох умов змащування. Під умовним ресурсом розуміється розрахунковий ресурс, що міг би бути досягненим при роботі дизеля на оливі з

відповідним конкретним напрацюванням, тобто якщо дизель працює на оливі з незмінними властивостями. Тому при прогнозуванні дійсного ресурсу вкладишів слід користуватися поняттям середнього ресурсу.

Застосування технології ЕО, розкритої в роботі [12], як видно з рис. 2, дає змогу збільшити умовний ресурс вкладишів в 1,8 раза для свіжої оливи та 1,3 раза для відпрацьованої оливи. Це

свідчить про те, що їхній дійсний середній ресурс може бути збільшений приблизно в 1,55 раза.

Висновки

1. Аналіз останніх робіт з дослідження мащення та довговічності підшипників ковзання показав, що головним прагненням науковців і конструкторів є забезпечення мінімального тертя і зношування елементів підшипників. Такого результату можна досягти зменшенням товщини гідродинамічної мастильної плівки до рівня еластогідродинамічної, навіть максимальної граничної, але при цьому слід забезпечити достатню несучу здатність плівки, бо при зменшенні тертя зростає інтенсивність зношування. Одним із перспективних методів вирішення цього завдання є застосування електричної обробки оливи, при цьому особливої ефективності цей метод набуває при застосуванні сильно полярних специфічних присадок, здатних до утворення міцних рідкокристалічних молекулярних шарів з низьким опором зсуву в площині тертя.

2. На прикладі напівсинтетичної моторної оливи EXTRA DI 10W-40 із різним строком напрацювання в дизелі Д-240 проведені випробування вкладишів колінчастого вала на зносостійкість, що підтвердили високу ефективність електричної обробки оливи при терті зразків. Встановлено, що застосування технології ЕО під час експлуатації при роботі двигуна дає змогу збільшити умовний ресурс вкладишів в 1,8 раза для свіжої оливи та 1,3 раза для відпрацьованої оливи, при цьому їхній дійсний середній ресурс зростає в 1,55 раза.

3. Отримані експериментальні дані підтвердили також суттєвий вплив напрацювання оливи на зносостійкість і ресурс підшипників ковзання. Встановлено, що протягом повного строку напрацювання оливи у двигуні 300 мото-годин інтенсивність зношування та умовний ресурс вкладишів зменшується майже в три рази, незалежно від застосування електричної обробки. Такі дані свідчать про доцільність подальшої оптимізації періодичності заміни оливи.

Список використаних джерел

1. Чичинадзе А. В. Справочник по триботехнике. Т. 2. Смазочные материалы, техника смазки, опоры скольжения и качения / А. В. Чичинадзе, М. Хебда. Москва: Машиностроение, 1990. 419 с.
2. Holmberg K., Andersson P., Erdemir A. Global energy consumption due to friction in passenger cars. *Tribology International*. 2012. Vol. 47. P. 221–234. DOI: 10.1016/j.triboint.2011.11.022.
3. Ligier J.-L., Noel B. Friction reduction and reliability for engines bearings. *Lubricants*. 2015. № 3(3). P. 569–596. DOI: 10.3390/lubricants3030569.
4. Nikolakopoulos P. G., Papadopoulos C. A. Controllable high speed journal bearings, lubricated with electro-rheological fluids, An analytical and experimental approach. *Tribology International*. 1998. Vol. 31, №. 5. P. 225-234. DOI: 10.1016/S0301-679X(98)00025-5.
5. Stanway R. Smart fluids: Current and future developments. *Mater Sci Technol* 20(8): 931–939 (2004). DOI.org/10.1179/026708304225019867.
6. Choi S. B., Wereley N. M., Li W., Yu M., Koo J. H. Applications of controllable smart fluids to mechanical systems. *Advances in Mechanical Engineering*. 2014. Vol. 2014. P. 5–6. DOI: 10.1155/2014/254864.

7. Michalec M., Svoboda P., Krupka I., Hartl M. Tribological behaviour of smart fluids influenced by magnetic and electric field—A review. *Tribology in Industry*. 40(4): 515–528 (2018). DOI: 10.24874/ti.2018.40.04.01.
8. Matsumura Y., Shiraishi T., Morishita S. Stiffness and damping of liquid crystal lubricating film under electric field. *Tribology International*. 2012. Vol. 54. P. 32–37. DOI: 10.1016/j.triboint.2012.05.009.
9. Michalec M., Svoboda P., Krupka I., Hartl M., Vencl A. Investigation of the tribological performance of ionic liquids in non-conformal EHL contacts under electric field activation. *Friction*. 8(5): 982–994 (2020). doi.org/10.1007/s40544-019-0342-y.
10. Voronin S., Dunaev A. Effects of electric and magnetic fields on the behavior of oil additives. *Journal of Friction and Wear*. 2015. Vol. 36. № 1. P. 33–39. DOI: 10.3103/S1068366615010158.
11. Лисіков Є. М., Воронін С. В., Афанасов Г. М., Гусак С. В. Протизношувальні випробування моторної оливи для тепловозних дизелів при обробці електромагнітним полем. *Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту*. Харків: УкрДАЗТ, 2006. Вип. 73. С. 60–65.
12. Воронін С. В., Стефанов В. О., Харківський О. С. Експлуатаційні випробування пристрою для електростатичної обробки моторної оливи. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. Харків: УкрДУЗТ, 2022. Вип. 200. С. 11–24. DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.200.2022.262678>.
13. Ахматов А. С. Молекулярная физика граничного трения. Москва: Физматгиз, 1963. 472 с.
14. König F., Jacobs G., Stratmann A., Cornel D. Fault detection for sliding bearings using acoustic emission signals and machine learning methods. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1097. 012013. DOI:10.1088/1757-899X/1097/1/012013.

Воронін Сергій Володимирович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри машинобудування та технічного сервісу машин, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0001-8443-3222. Тел.: +38(095)500-81-59. E-mail: voronin.sergey@ukr.net.

Харківський Олександр Сергійович, аспірант кафедри машинобудування та технічного сервісу машин, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-1222-9422. Тел.: +38(050)026-48-20. E-mail: kharsanya2806@gmail.com.

Губін Олександр Олександрович, аспірант кафедри машинобудування та технічного сервісу машин, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0001-8451-5236. Тел.: +38(099)788-19-06. E-mail: sash.gubin95@gmail.com.

Voronin Serhii, Dr. Sc. (Tech.), professor, Head of the Department of Mechanical Engineering and Technical Service of Machines, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0001-8443-3222.

Tel.: +38 (095)500-81-59. E-mail: voronin.sergey@ukr.net.

Kharkivskiyi Oleksandr, postgraduate student, Department of Mechanical Engineering and Technical Service of Machines, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-1222-9422.

Tel.: +38(050)026-48-20. E-mail: kharsanya2806@gmail.com.

Hubin Oleksandr, postgraduate student, Department of Mechanical Engineering and Technical Service of Machines, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0001-8451-5236.

Tel.: +38(099)788-19-06. E-mail: sash.gubin95@gmail.com.

Статтю прийнято 20.09.2023 р.