МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ПІВНІЧНО-СХІДНИЙ НАУКОВИЙ ЦЕНТР
ТРАНСПОРТНОЇ АКАДЕМІЇ УКРАЇНИ

УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ УКРАЇНСЬКОГО ДЕРЖАВНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

Випуск 200

Харків 2022

УДК 656.2(062)

У Збірнику наукових праць УкрДУЗТ публікуються результати наукових досліджень, наукові та конструкторські розробки та інші матеріали вчених, фахівців залізничного транспорту і промислових підприємств, спрямовані на вирішення сучасних задач та проблем організації перевезень та управління на транспорті, рухомого складу і тяги поїздів, транспортного будівництва та залізничної колії, теплоенергетики та матеріалознавства, автоматики, телемеханіки та зв'язку тощо.

Збірник наукових праць УкрДУЗТ призначений для інженерно-технічних працівників, магістрантів, студентів і науковців залізничного транспорту та інших галузей промисловості.

З електронною версією збірника можна ознайомитися на сайті: https://bit.ly/3vVHlv3.

Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту включено до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus (Польща).

З реєстрацією збірника можна ознайомитися на сайті http://jml2012.indexcopernicus.com.

Google Scholar профиль: https://scholar.google.com.ua

Веб-сторінка збірника: https://kart.edu.ua/unit/zbirnik-ukrsurt

Реферативна база "Наукова періодика України": http://csw.kart.edu.ua

ISSN (p) 1994-7852
ISSN (online) 2413-3795

Свідоцтво про державну реєстрацію КВ № 21515 - 11415ПР від 27.07.2015 р. Друкується за рішенням вченої ради університету, протокол № 3 від 17 червня 2022 р.

Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту включено до списку друкованих (електронних) періодичних видань, що включаються до Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук (Наказ МОН України від 15.10.2019 р. № 1301).

ISSN 1994-7852
Зареєстровано 2 червня 2007 р.
у ISSN International Centre 20. Rue Bachaumont, 75002 PAPIS, FRANCE

© Український державний університет залізничного транспорту, 2022

Редакційна колегія

Головний редактор – Вовк Руслан Володимирович, доктор фізико-математичних наук, професор, УкрДУЗТ
Випусковий редактор – Кравець Андрій Михайлович, кандидат технічних наук, доцент, УкрДУЗТ

Залізничний транспорт (273)
Пузир В. Г., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Фомін О. В., д.т.н., доцент (ДУІТ, м. Київ)
Путято А. В., д.т.н., доцент (ГДТУ ім. П. О. Сухого, Республіка Білорусь)
Горобченко О. М., д.т.н., доцент (ДУІТ, м. Київ)
Дацун Ю. М., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Мартинов І. Е., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Bureika G., dsc, professor (VGTU, Литва)
Михалків С. В., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Ловська А. О., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)

Транспортні технології (275)
Панченко С. В., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Бутько Т. В., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Прохорченко А. В., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Шраменко Н. Ю. д.т.н., професор (ДБТУ)
Мороз М. М. д.т.н., професор (КНУ, м. Кременчук)
Кириллова О. В., д.т.н., доцент (ОНМУ, м. Одеса)
Бабаєв М. М., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Лаврухін О. В., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Потапов Д. О., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Ходаківський О. М., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)

Будівництво та цивільна інженерія (192)
Бліхарський З. Я., д.т.н., професор (НУ Львівська політехніка)
Борзяк О. С., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Ватуля Г. Л., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Лобяк О. В., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Орел Є. Ф., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Плугін А. А., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Плугін Д. А., д.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Пушкарьова К. К., д.т.н., професор (КНУБА)
Толмачов С. М., д.т.н., професор (ХНАДУ)
Трикоз Л. В., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Шабанова Г. М., д.т.н., професор (НТУ ХПІ)
Шмуклер В. С., д.т.н., професор (ХНУМГ)
Fisher Hans-Bertram., dr. ind., professur (Bauhaus-Universitet Weimar F.A., Німеччина)
Опанасенко О. В., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)

Геодезія та землеустрій (193)
Eimuntas Paršeliūnas, Prof. Habil Dr. (VGTU, Литва)
Jūrate Sužiedelytė Visockienė, Assoc. Prof. Dr. (VGTU, Литва)
Угненко Є. Б., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Маланчук М. С., д.т.н., доцент (НУ «Львівська політехніка»)
Церклевич А. Л., д.т.н. доцент (НУ «Львівська політехніка»)
Viselga Gintas, Assoc. Prof. Dr. (VGTU, Литва)
Мамонов К. А., д.е.н., професор (ХНУМГ)
Савенко В. Я., д.т.н., професор (НТУ, м. Київ)

Механічна інженерія (131, 132, 133)
Астанін В. В., д.т.н., професор (НАУ м. Київ)
Воронін С. В., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Геворкян Е. С., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Ковальова І. М., к.т.н., доцент (НАНБ, Білорусь)
Онопрейчук Д. В., к.т. н., доцент (УкрДУЗТ)
Стефанов В. О., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Тимофеєв С. С., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Тимофеєва Л. А., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Федориненко Д. Ю., д.т.н., професор (Tohoku University, Японія)

Теплоенергетика (144)
Каграманян А. О., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Мороз В. І., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Фалендиш А. П., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Грицук І. В., д.т.н., доцент (ХМДА, м. Херсон)
Сотник М. І., д.т.н., доцент (СДУ, м. Суми)
Дешко В. І., д.т.н., професор (НТУ, м. Київ)
Бабіченко Ю. А., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Pavlenko A., dsc. tech., profesor (KUT, Poland)
Bartoszewicz J., dsc. tech., profesor (PUT, Poland)
Tomaszewski F., phd, profesor (PUT, Poland)

ЗМІСТ

Механічна інженерія (131, 132, 133)

Дмитриченко М. Ф., Богданов І. М. Причини руйнування при масляному голодуванні в парі тертя «поршневе кільце – гільза циліндра» 6

Воронін С. В., Стефанов В. О., Харківський О. С. Експлуатаційні випробування пристрою для електростатичної обробки моторної оливи 11

Теплоенергетика (144)

Редько І. О., Бурда Ю. О., Півненко Ю. О., Джиоєв Р. Л. Дослідження процесів спалювання бурого вугілля у вихровій топці шляхом комп'ютерного моделювання 25

Залізничний транспорт (273)

Панченко С. В., Балака Є. І., Панченко В. В., Резуненко М. Є. Вплив подовження «життєвого циклу» локомотивів на ВВП країни та економіку залізничної галузі 36

МЕХАНІЧНА ІНЖЕНЕРІЯ (131, 132, 133)

УДК 621.891

ПРИЧИНИ РУЙНУВАННЯ ПРИ МАСЛЯНОМУ ГОЛОДУВАННІ В ПАРІ ТЕРТЯ «ПОРШНЕВЕ КІЛЬЦЕ – ГІЛЬЗА ЦИЛІНДРА»

Д-р техн. наук М. Ф. Дмитриченко, асп. І. М. Богданов

CAUSES OF DESTRUCTION DURING OIL STARVING IN THE FRICTION COUPLE "PISTON RING - CYLINDER LINER"

D. Sc. (Tech.) M. Dmytrychenko, postgraduate student Bogdanov I. M.

DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.200.2022.262663

Анотація. *У дослідженні йдеться про явище зношування в парі тертя «поршневе кільце – гільза циліндра» під час стендових випробувань на дослідних зразках. Трибологічну характеристику сухого тертя, яке імітувало масляне голодування [9], оцінювали з використанням зворотно-поступального руху трибометра. Значний знос спостерігався на поверхні гільзи, виготовленої з сірого чавуну, при контакті зі сталевою хромованою поверхнею. Це можна пояснити значним градієнтом жорсткості трибопари в спряженні. При хромованому покритті, що має помітну твердість, по краю гільзи спостерігається екструзія і спінювання поверхні, що свідчить про зміну зносу. Коефіцієнт тертя при сухому ковзанні зі ступінчастими збільшеннями навантаження показав нестійкий стан тертя, що недооцінюється при роботі будь-якої трибологічної системи.*

Ключові слова: *масляне голодування, пара тертя, руйнування, поршневе кільце, гільза циліндра.*

Abstract. *The study deals with the phenomenon of wear in the friction pair of the piston ring - cylinder liner during bench tests on prototypes. The tribological performance of dry friction simulating oil starvation was evaluated using the reciprocating motion of the tribometer. Significant wear was observed on the surface of the sleeve, made of gray cast iron, in contact with the chrome steel surface. This can be explained by a significant gradient in the rigidity of the tribopair in conjugation. With a chrome coating that has a noticeable hardness, extrusion and foaming of the surface are observed along the edge of the sleeve, which indicates a change in wear. The coefficient of friction in dry sliding with stepped load increases showed an unstable state of friction, which is not appreciated in the operation of any tribological system.*

Piston rings are used to seal the exhaust outlet gap between the piston and the liner for efficient operation of the internal combustion engine. The distribution surface of the cylinder liner and piston ring during reciprocating motion is subject to continuous wear due to constant stresses, high temperatures and intense loads. Thus, the performance and reliability of such heavy-duty engine components depend on the topography of the conjugate surfaces and the associated tribological interactions. Therefore, it is necessary to study the tribological behavior of conjugates of liners - rings that are subject to wear during oil starvation, and designed to effectively prevent exfoliation. This phenomenon leads to new surface coatings and modifications with significant wear properties in difficult operating conditions.

Under certain conditions of loading, sliding and lubrication, the temperature rises to a critical state, the formation of the lubricating film is stopped and any formed lubricating film is destroyed, which leads to a catastrophic increase in friction. This continuous thermal feedback with the contact zone leads to wear of the friction pair of the piston ring - the cylinder liner. Given the changes in the design and materials of the engine, despite the fact that engine performance has increased significantly with reduced emissions, it is impossible to exclude increased performance and engine failure.

Keywords: *oil starving, friction couple, destruction, piston ring, cylinder liner.*

Вступ. Поршневі кільця застосовуються для ущільнення зазора виходу вихлопного газу між поршнем і гільзою для ефективної роботи двигуна внутрішнього згорання. Поверхня розподілу гільзи циліндра та поршневого кільця при зворотно-поступальному русі зазнає безперервного зносу за рахунок постійних напружень, високої температури та інтенсивного навантаження [1]. Отже, продуктивність і надійність таких вузлів двигунів з великим навантаженням залежить від топографії спряжених поверхонь і пов'язаних з нею трибологічних взаємодій. Необхідно дослідити трибологічну поведінку спряження вкладиш – кільце, що зношується при масляному голодуванні, і призначення засобів для ефективного запобігання відшаровуванню [2]. Це явище призводить до необхідності нових поверхневих покриттів і модифікацій з істотними властивостями зносу в складних умовах експлуатації.

Задир виникає тоді, коли збільшення тертя між трибоконтактами наближається до катастрофічного стану, що призводить до сильного зварювання, пошкодження і розтріскування контактних поверхонь до такої міри, що вони стають потенційно непридатними для експлуатації. За відсутності будь-якої змащувальної плівки контактна область має тенденцію «зварюватися» разом. Однак цей зварний шов не дуже міцний, щоб зупинити відносне ковзання між гільзою циліндра і поршневим кільцем, а отже, повністю відокремлюється, що призводить до перенесення матеріалу з більш м'якої до більш твердої поверхні [3].

За певних умов навантаження, ковзання та мащення температура підвищується до критичного стану, формування змащувальної плівки припиняється, і будь-яка сформована мастильна плівка руйнується, що призводить до катастрофічного зростання тертя. Цей безперервний тепловий зворотний зв'язок із зоною контакту призводить до зношування пари тертя «поршневе кільце – гільза циліндра» [3]. З урахуванням змін у конструкції і матеріалах двигуна, не дивлячись на те, що продуктивність двигуна значно зросла при зниженні викидів, не можна виключати підвищений знос і збої в роботі двигуна.

Аналіз проведених досліджень і публікацій. Поверхневі обробки, що застосовуються до гільз циліндрів, включають лазерне текстурування, хонінгування, поверхневе заглиблення, у той час як поверхня поршневих кілець включає технології осадження, такі як термічне розпилювання, гальванічне осадження, катодне осадження, лазерне легування поверхні і поверхневі обробки – ударне зміцнення, поверхневе азотування, поверхневе зміцнення зі структурою залізо-нітрид на області поверхні кільця [4…6].

Визначення мети та завдання дослідження. Визначення трибологічних характеристик пари тертя «гільза циліндра – поршневе кільце» при масляному голодуванні і засобів запобігання відшарування металу в парі при масляному голодуванні.

Завдання дослідження:

- визначити причини погіршення трибологічних характеристик у парі «гільза циліндра – поршневе кільце» в умовах масляного голодування;
- запропонувати оптимальний варіант фінішної обробки гільзи циліндрів ДВЗ, що працюють в умовах масляного голодування;

• визначити додаткові умови і матеріали для виготовлення поршневих кілець, які поліпшували б трибологічні характеристики контактної пари «гільза циліндра – поршневе кільце», що працюють в умовах масляного голодування.

Основна частина дослідження. Зразки поршневого кільця, використовувані в цьому трибологічному дослідженні, отримані з двигуна зі спалахом від стиску великої потужності. Поршневе кільце являє собою верхнє компресійне кільце з внутрішнім скошеним верхом і 9,4 мм номінального отвора циліндра. Контакт є чисто конформним, що гарантує будь-яке зміщення і контактну сумісність поршневого кільця (було розрізано на 13 частин). Гільза циліндра являє собою сірий чавун з типовим складом і властивостями (механічною і термічною). Спочатку кожен вкладиш розрізали на секції розміром 25,4×50,8 мм, але це спричинило б великі втрати матеріалу. Замість них використовувались секції 12,18×50 мм від кожного зразка. Поверхня гільзи циліндра текстурована хонінгуванням алмазними хонами, розташованими під кутом 45^0 упоперек западин шорсткості (поперечних мікроотворів). Робота з хонінгування вершин шорсткості призводить до їх перехрещування, які під час робочих циклів двигуна ведуть себе як резервуари зі змащувальним матеріалом. Для всіх операцій механічної обробки і обробки зразків поверхні обох трибоелементів були збережені для їхньої оригінальності за шорсткістю поверхні і близькістю до узорів поверхні. Кільце має плазмове напилене хромоване покриття товщиною 42 мкм з текстурованими сферичними мікроотворами. Товщину покриття, яку вимірювали мікроскопом з використанням стандартного обладнання, показано на рис. 1, *а*.

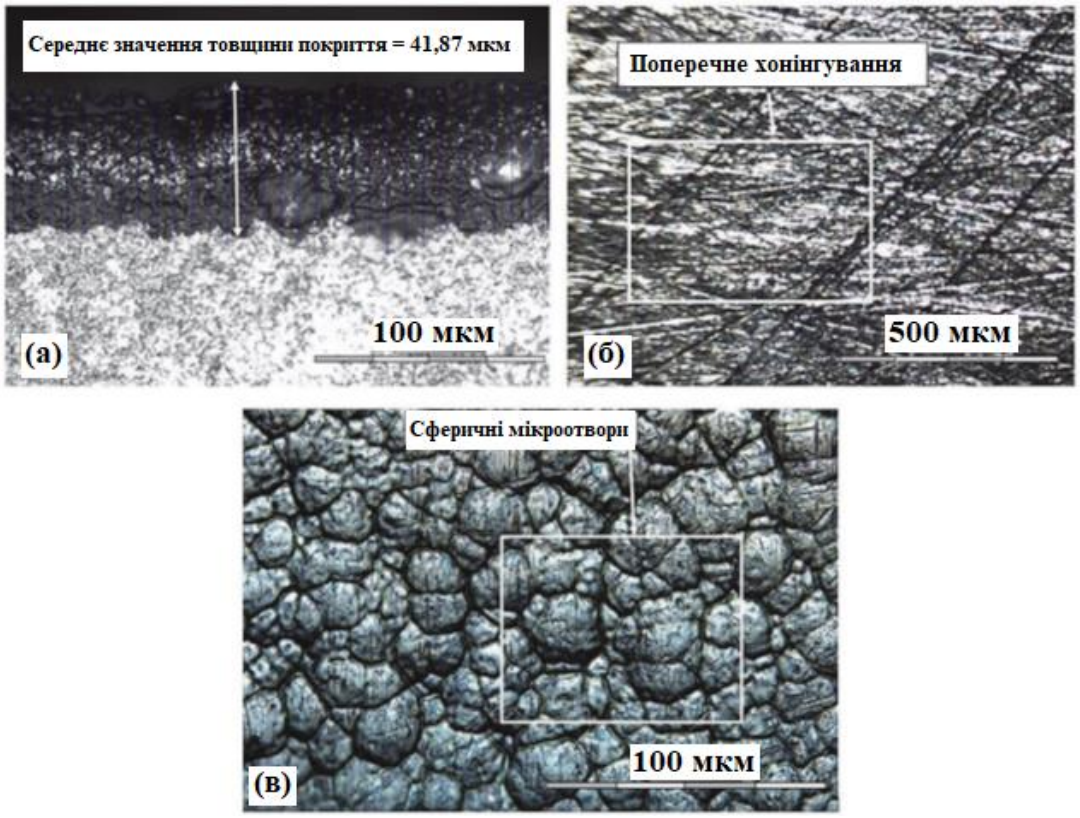


Рис. 1. Збільшені зображення товщини покриття, поверхні кільця та підложки:
а – збільшене мікроскопічне зображення вимірювання товщини покриття; б – мікроскопічне зображення поверхні підложки; в – мікроскопічне зображення поверхні кільця

Кільцеві сегменти були закріплені у виготовленому конформному кільцевому тримачі, закріпленому у зворотно-поступальному важелі універсального трибометра. Помітний рисунок хонінгування поперечини добре видно на рис. 1, *б*, що відповідає сірим зразкам підложки, у той час як текстуровані сферичні мікроотвори можна бачити на рис. 1, *в*, що відповідають хромовому покриттю зразків кілець.

Коефіцієнт тертя як функція кумулятивного часу для моделювання сухого ковзання, що імітує масляне голодування, безперервно контролювали і оцінювали при нормальних навантаженнях 20, 40 і 60 Н на універсальному трибометрі Magnum. Відзначено, що будь-який приріст частоти зворотно-поступального руху під час експериментів означає зменшення середньої сили після падіння збору фрикційних даних і врешті-решт резонансного відгуку з помилками [7]. Отже забезпечується постійна частота зворотно-поступального руху і повторюваність принаймні з трьома наборами експериментів.

Усі отримані результати орієнтують на перші 3 хв ковзання. Безперервна стійка флуктуація може спостерігатися при сухому ковзанні при базовому навантаженні 20 Н упродовж триботестів і пояснюється орієнтацією зерен графітових включень після видалення нерівностей в області зносу від трибоелемента гільзи циліндра. Середнє значення отриманого коефіцієнта тертя становить 0.16. Цей вихід графітових включень міг би ініціювати часткове тверде мастило і, отже, обмежувати силу тертя. Після виходу графітових включень збільшується площа контакту через надмірне навантаження, що призводить до видалення нерівностей чистої поверхні і впливає на фрикційну характеристику.

Усі зразки, що піддавались трибовипробуванням, були промиті за допомогою ультразвуку ацетоном і витерті насухо перед тим, як продовжити мікроскопічні і профілометричні дослідження. 3D профілометрія зі стандартною повторюваністю використовувалась для вимірювання об'єму зносу за рахунок інтегрування в область зносу рубців 16 паралельних профілів, доступних з використанням глибини рубця при оптичному дозволі 70. Середня шорсткість поверхні 0,18 мкм перед трибовипробуванням спостерігалась у поршневого кільця, покритого хромом, у той час як отриманий Ra гільзи становив 0,92 мкм. Після триботестування відбулося істотне зниження значень Ra як для поршневого кільця, так і гільзи циліндра 0,12 мкм і 0,48 мкм відповідно. Зменшення значень Ra після триботестування можна віднести на поверхневе зношування і заповнення заглиблень частинками зносу.

Сухе ковзання спряження показало гострі виступи на доріжках зносу, які видавлювались з поверхні при масляному голодуванні. Спостерігається постійне збільшення об'ємів зносу зі збільшенням нормального навантаження. Отримані значення коефіцієнта зносу становлять близько $2{,}2…3{,}5\times10^{-4}$ мм^3/Нм для гільзи циліндра з середнім значення 10,5 мкм, що можна пов'язати з найвищою зносостійкістю, що зазнає поступового збільшення навантаження. Отже, суттєва різниця у твердості та інших механічних властивостях трибоелементів у поєднанні з хромовим покриттям характеризує чудові характеристики зносу, у той час як гільза циліндра показує характеристики зносу з руйнуванням при масляному голодуванні [8].

Висновки. Встановлено, що причиною задирів і відшарування у трибосистемі «гільза циліндра – поршневе кільце» є катастрофічне зростання тертя в парі, що призводить до «зварювання» деталей і розтріскування контактних поверхонь.

Для ліквідації катастрофічного зростанні тертя в парі «гільза циліндра – поршневе кільце» в умовах масляного голодування слід застосовувати площинно-вершинне хонінгування гільзи з

заповненням масляних резервуарів поверхні твердим мастилом.

Для поліпшення триботехнічних характеристик у контакті «гільза циліндра – поршневе кільце» в умовах масляного голодування при роботі ДВЗ слід використовувати тверде PVD – покриття товщиною 2…5 мкм.

Список використаних джерел

1. Olander P., Hollman P. and Jacobson S. Piston Ring and Cylinder Liner Wear Aggravation Caused by Transition to Greener Ship Transports–Comparison of Samples from Test Rig and Field. *Wear*. 302. 1-2. 2013. 1345-1350.

2. John A. P. and Agarwal V. K. Optimization of Piston Skirt Profile Design to Eliminate Scuffing and Seizure in a Water Cooled Gasoline Engine. *SAE Technical Paper*. 2015-01-1726, 2015.

3. Enthoven J. C., Cann P. M. and Spikes H. A. Temperature and Scuffing. *Tribology Transactions*. 36. 2. 1993. 258-266.

4. Yoon K. -K., Kim W. -B. and Na S. -J. Shape Deformation of a Piston Ring Groove by Laser Surface Hardening. *Surface and Coatings Technology*. 78. 1-3. 1996. P. 157-167.

5. Ezhilmaran V., Vasa N. J. and Vijayaraghavan L. Investigation on Generation of Laser Assisted Dimples on Piston Ring Surface and Influence of Dimple Parameters on Friction. *Surface and Coatings Technology*. 335. 2018. P. 314-326.

6. Lin J., Wei R., Bitsis D. C. and Lee P. M. Development and Evaluation of Low Friction TiSiCN Nanocomposite Coatings for Piston Ring Applications. *Surface and Coatings Technology*. 298. 2016. P. 121-131.

7. Plint A. G. Friction Force Measurement in Reciprocating Tribometers. STLE, 2011.

8. Krushchov M. M. and Babichev M. A. The Connection between Hardness under Compression and Hardness during Abrasion in Metals and Minerals. (in Russian). *Wear*. 1, 3, 1957. 260.

9. Дмитриченко М. Ф., Гохар Р., Уэн Дж. Эластогидродинамическая смазка линейных контактов в условиях обильной смазки и масляного голодания. *Трение и износ*. 1993. Т. 14, № 13. С. 438–443.

Дмитриченко Микола Федорович, доктор технічних наук, професор кафедри «Виробництво, ремонт та матеріалознавство» Національного транспортного університету. ORCID iD: 0000-0003-4223-1838. Тел.: (044) 280-82-03. E-mail: dmitrichenko@ntu.edu.ua.
Богданов Іван Миколайович, аспірант кафедри «Виробництво, ремонт та матеріалознавство» Національного транспортного університету. ORCID iD: 0000-0001-6346-4388. Тел.: (044) 280-98-05. E-mail: gmiller180890@gmail.com.

Mykola Dmytrychenko, D. Sc. (Tech.), professor, department of Manufacturing repair and materialoved, National Transport University. ORCID iD: 0000-0003-4223-1838. Tel.: (044) 280-82-03. E-mail: dmitrichenko@ntu.edu.ua.
Ivan Bogdanov, postgraduate student, department of Manufacturing repair and materialoved, National Transport University. ORCID iD: 0000-0001-6346-4388. Tel.: (044) 280-98-05. E-mail: gmiller180890@gmail.com.

Статтю прийнято 06.06.2022 р.

УДК 621.89

ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ВИПРОБУВАННЯ ПРИСТРОЮ ДЛЯ ЕЛЕКТРОСТАТИЧНОЇ ОБРОБКИ МОТОРНОЇ ОЛИВИ

Д-р техн. наук С. В. Воронін, канд. техн. наук В. О. Стефанов,
асп. О. С. Харківський

OPERATING TESTS OF THE DEVICE FOR ELECTROSTATIC ENGINE OIL TREATMENT

D. Sc. (Tech.) S. Voronin, PhD (Tech.) V. Stefanov,
postgraduate student O. Kharkivskyi

DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.200.2022.262678

Анотація. *У статті наведено матеріали експлуатаційних випробувань удосконаленого пристрою для електростатичної обробки напівсинтетичної моторної оливи EXTRA DI 10W-40 при її роботі в системі змащування дизельного двигуна Д-240 колісного трактора МТЗ-82. Наведено конструктивні особливості та технічні характеристики удосконаленого пристрою, місце його встановлення в систему змащування двигуна і підключення до бортової мережі машини. Наведено результати випробувань пристрою за критеріями впливу електростатичної обробки на окремі характеристики дизельного двигуна і трибологічні характеристики моторної оливи.*

Ключові слова: *дизельний двигун, система змащування, пристрій, моторна олива, електростатична обробка, напрацювання.*

Abstract. *The article presents the materials of operational tests of the improved device for electrostatic treatment of semi-synthetic motor oil EXTRA DI 10W-40 during their operation in the lubrication system of the diesel engine D-240 wheeled tractor MTZ-82. Since the testing of the device consisted of two stages, the main part of the article consists of two interrelated parts, which show the main results for each stage. The first part presents the design features and technical characteristics of the advanced device, as well as the place of its installation in the engine lubrication system and connection to the onboard network of the machine. Particular attention in describing the design of the device is paid to its differences from previous counterparts, namely the presence of stepwise regulation of the output voltage level and the presence of protection of the oil from electric breakdown. The second part of the article presents the test results of the device according to the criteria of the influence of electrostatic treatment on the characteristics of the diesel engine and some performance properties of engine oil. When disclosing the effect of electrostatic oil treatment on engine characteristics, the article presents data on changes in oil pressure in the main line of the lubrication system and changes in compression in the engine cylinders as the engine speed increases. When disclosing the effect of electrostatic treatment on the performance properties of engine oil, data on changes in the tribological characteristics of the oil, namely the diameter of the wear spot, with its different operating time in the engine lubrication system. The diameter of the wear spot was installed on a four-ball friction machine according to the method described in GOST 9490-75. According to this method, the values of the diameter of the wear spot for the engine oil during its operation in the engine lubrication system without the use of electrostatic treatment, as well as with the use of such treatment in the built-in device. The final part of the article presents an analysis of*

the results, conclusions and practical recommendations for the application of the proposed improved device in the lubrication systems of diesel engines of self-propelled vehicles.

Keywords: *diesel engine, lubrication system, device, engine oil, electrostatic treatment, operating time.*

Вступ. Головним агрегатом будь-якої самохідної машини є її силова енергетична установка. Загальновідомо, що в більшості технологічних і транспортних самохідних машин залізничної, будівельної та сільськогосподарської галузі як силова установка застосовуються дизельні двигуни. Саме тому надійність самохідних машин переважно визначається надійністю дизельного двигуна, показники якої необхідно підтримувати в експлуатаційних умовах на заданому рівні протягом тривалого терміну роботи. Для забезпечення заданого рівня надійності технологічних і транспортних машин в умовах експлуатації слід дотримуватись традиційних обов'язкових заходів з технічного обслуговування та ремонту дизельних двигунів, а також застосовувати якісні паливо-мастильні матеріали. Однак, якщо експлуатуючі підприємства ставлять за мету підвищення економічної ефективності машин, традиційних заходів недостатньо. Ключову роль при досягненні такої мети мають методи підвищення надійності двигунів в експлуатації, які можуть бути впроваджені шляхом всебічного дослідження характеристик двигунів. Одним з таких методів є метод покращення трибологічних характеристик моторних олив шляхом їхньої безперервної електростатичної обробки [1-3]. Така обробка виконується у спеціальних вбудованих пристроях, призводить до уповільнення зношування деталей двигуна, при цьому вона може бути реалізована без суттєвої зміни конструкції системи змащування. Оскільки уповільнення зношування досягається через вплив на характеристики моторної оливи, експлуатаційні випробування пристроїв мають складатись із випробувань як характеристик двигуна, так і експлуатаційних властивостей оливи при різному напрацюванні.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Фундаментальні основи впливу електричних полів на трибологічні властивості рідких мастильних матеріалів вперше були викладені в монографії [1], де вказано, що при орієнтаційній поляризації молекул із постійним електричним дипольним моментом процес їхньої адсорбції на поверхнях тертя інтенсифікується, що призводить до зростання товщини граничної мастильної плівки, внаслідок чого зменшується інтенсивність зношування. Робота [1] має суто теоретико-експериментальний характер, у ній розглядається вплив електричного поля на мінеральні гідравлічні оливи, вона не містить відомостей щодо випробувань двигунів внутрішнього згорання при обробці моторних олив. Хоча треба відзначити, що ця робота є базисною, з точки зору розроблення підходів до практичної реалізації методу електричної обробки олив. Подальший розвиток фізичних основ впливу електричного поля на трибологічні характеристики олив із присадками наведено в статті [2]. У цій роботі показано, що на мастильну здатність олив із присадками впливають процеси агрегації присадок під впливом зовнішнього електричного поля, що призводить до формування рідкокристалічної граничної плівки пошарової будови. Головною відмінністю результатів роботи [2] від роботи [1] є встановлення факту формування різних за товщиною та несучою здатністю плівок при різній напруженості електричного поля. Тобто додається суттєва вимога до практичної реалізації методу електричної обробки олив, яка полягає в необхідності регулювання величини напруженості поля, залежно від типу та

концентрації присадок в оливі. Цей факт також підтверджується результатами роботи [3]. У цілому роботи [1-3] дають фізичні основи для створення пристроїв електричної обробки олив у системах змащування машин, однак самі не містять таких практичних даних.

При розробленні пристроїв для електростатичної обробки олив дизельних двигунів треба спиратись також на результати робіт [4-7] і відомості з патенту [8]. Так, у роботах [4, 5] наведено загальний вигляд і характеристики пристрою для циркуляційної системи змащування та визначено основні вихідні дані для проєктування. У роботах [6, 7] встановлено певні діапазони раціональних режимів обробки нафтових олив електричним полем. Однак інформація про параметри пристрою з робіт [4, 5] і патенту [8], а також дані робіт [6, 7] не містять відомостей щодо параметрів і реалізації захисту оливи від електричного пробою як фактора, що призводить до деструкції оливи.

Виходячи з аналізу робіт, спрямованих на дослідження та реалізацію методу електричної обробки технічних олив, можна сформулювати такі основні напрями удосконалення пристрою для електростатичної обробки моторних олив дизельних двигунів: на підставі робіт [1-3, 9] – забезпечення регулювання рівня вихідної напруги як величини, що визначає напруженість електростатичного поля між електродами; робіт [4, 5, 7] – забезпечення автоматичного захисту від електричного пробою оливи.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою дослідження є обґрунтування основних параметрів удосконаленого пристрою для електростатичної обробки моторної оливи та встановлення впливу такої обробки на окремі характеристики дизельного двигуна протягом експлуатації і трибологічні характеристики оливи з різним напрацюванням у двигуні.

Для досягнення поставленої мети проводились експлуатаційні випробування пристрою на двигуні, у яких вирішувались такі завдання:

– розроблення удосконаленого пристрою та його встановлення в систему змащування двигуна Д-240 колісного трактора МТЗ-82;

– вимірювання компресії в циліндрах двигуна і тиску в головній магістралі протягом випробувань із заданою періодичністю;

– оцінювання трибологічних характеристик моторної оливи (за величиною середнього діаметра плями зносу на чотирикульковій машині) із різним напрацюванням у системі змащування.

Основна частина досліджень

Розроблення удосконаленого пристрою. Пристрій, що розробляється, призначений для встановлення в систему змащування дизельного двигуна Д-240 колісного трактора МТЗ-82, обраного як фізичну модель самохідної машини. Передбачається безперервна робота пристрою протягом напрацювання трактора на другій частині випробувань. За рекомендаціями, наведеними в роботах [4, 5, 6], основними вихідними даними для розроблення є:

– номінальна продуктивність масляного насоса – 0,001 м^3/с (60 л/хв);

– робоча температура оливи – 90 °С;

– олива напівсинтетична EXTRA DI 10W-40, густина 890 кг/м^3, кінематична в’язкість при 100 °С – 14,4 мм^2/с;

– електрична напруга в бортовій мережі – 12 В;

– взаємне розташування електродів – коаксіальне.

Пристрій складається з блока обробки оливи, вбудованого в систему змащування, та електронного блока керування, який живиться від електричної мережі.

Основними параметрами блока обробки оливи є діаметри електродів, довжина зони обробки, кількість електродних пар. Вказані параметри слід підбирати з умови забезпечення

мінімального гідравлічного опору при ламінарній течії, а також з умови забезпечення необхідної швидкості потоку оливи в зоні обробки, яка, за рекомендаціями роботи [1], складає 6 м/с.

Загальна площа перерізу між електродних просторів визначається як

$$S = \frac{Q_H}{v}, \qquad (1)$$

де Q_H – номінальна продуктивність масляного насоса, м^3/с;

v – раціональна швидкість потоку оливи, м/с.

Площа одного між електродного простору для коаксіального розташування

$$S_i = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4}, \qquad (2)$$

де D – внутрішній діаметр зовнішнього електрода, м;

d – діаметр внутрішнього електрода, м.

Користуючись залежностями (1) і (2) кількість електродних пар пристрою визначається як відношення

$$n = \frac{S}{S_i}. \qquad (3)$$

Кількість електродних пар визначена вище лише за умови забезпечення потрібної швидкості потоку. Однак необхідно виконати перевірку конструктивних параметрів за величиною гідравлічних втрат. Основними будуть лінійні втрати тиску, що без урахування ексцентриситету визначаються за залежністю

$$\Delta p = \frac{6Q_H \mu L}{\pi n r \delta^3}, \qquad (4)$$

де μ – динамічна в'язкість оливи, Пас;

L – довжина зони обробки, м;

n – кількість електродних пар;

r – радіус внутрішнього електрода, м;

δ – коаксіальний зазор, м.

Прийнятним вважається перепад тиску не більше 5 % номінального тиску оливи в головній магістралі двигуна. Розрахунки параметрів блока обробки виконувались у середовищі Mathcad, а кінцеві значення наведено в табл. 1. Загальний вигляд виготовленого блока обробки наведено на рис. 1.

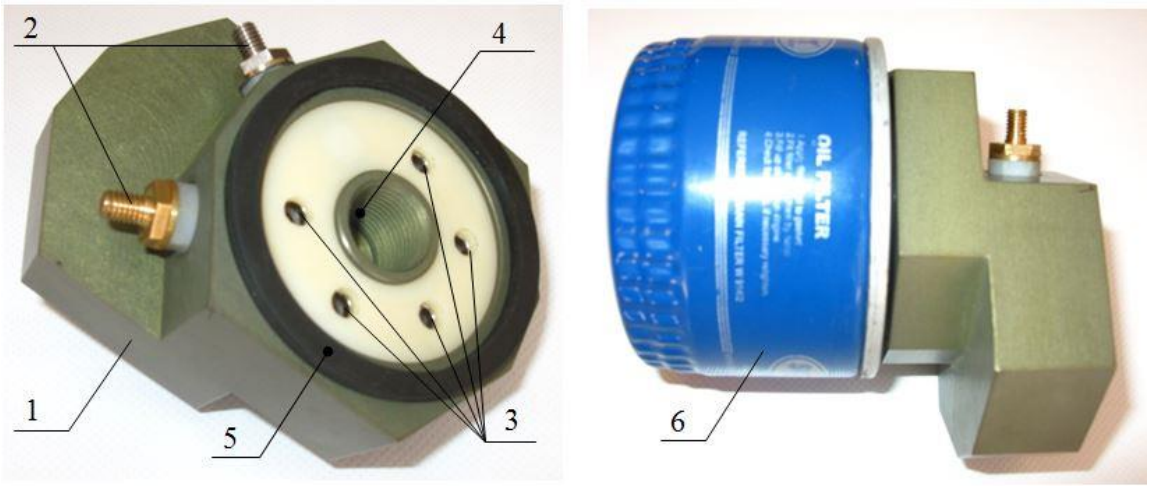


Рис. 1. Загальний вигляд блоку обробки:
1 – корпус; 2 – нарізні контакти; 3 – канали входу оливи в зони обробки;
4 – центральний канал виходу оливи; 5 – ущільнювальне кільце; 6 – фільтр

Таблиця 1

Розрахункові параметри, покладені в конструкцію блока обробки

Параметр	Значення
1. Довжина зони обробки L, м	0,01
2. Кількість електродних пар n, од.	5
3. Втрати тиску Δp, МПа	0,011

Для зменшення ваги корпус блока обробки виготовлений зі сплаву Д16Т, деталі електроізоляції – із поліаміду з температурою розм'якшення не менше 150 °С, що є оливостійким і не змінює механічних характеристик при одночасній дії температури і оливи.

Електронний блок керування виконує декілька функцій. Основною функцією є перетворення (збільшення) напруги бортової мережі 12 В на напругу живлення, що подається на блок обробки. В удосконаленому пристрої, що розроблявся, блок керування має дві суттєві відмінності. По-перше, у ньому реалізоване ступінчасте регулювання рівня вихідної напруги (рис. 2), встановлене відповідно до результатів досліджень [9]. По-друге, блок керування має захист за електричним струмом на кожному рівні вихідної напруги. Струм обмежений за величиною 5×200 μА, що виключає електричний пробій оливи з деструкцією [10], а також виключає коротке замикання при імовірному потраплянні струмопровідного елемента в зазор між електродами. Технічна характеристика блока керування наведена в табл. 2.

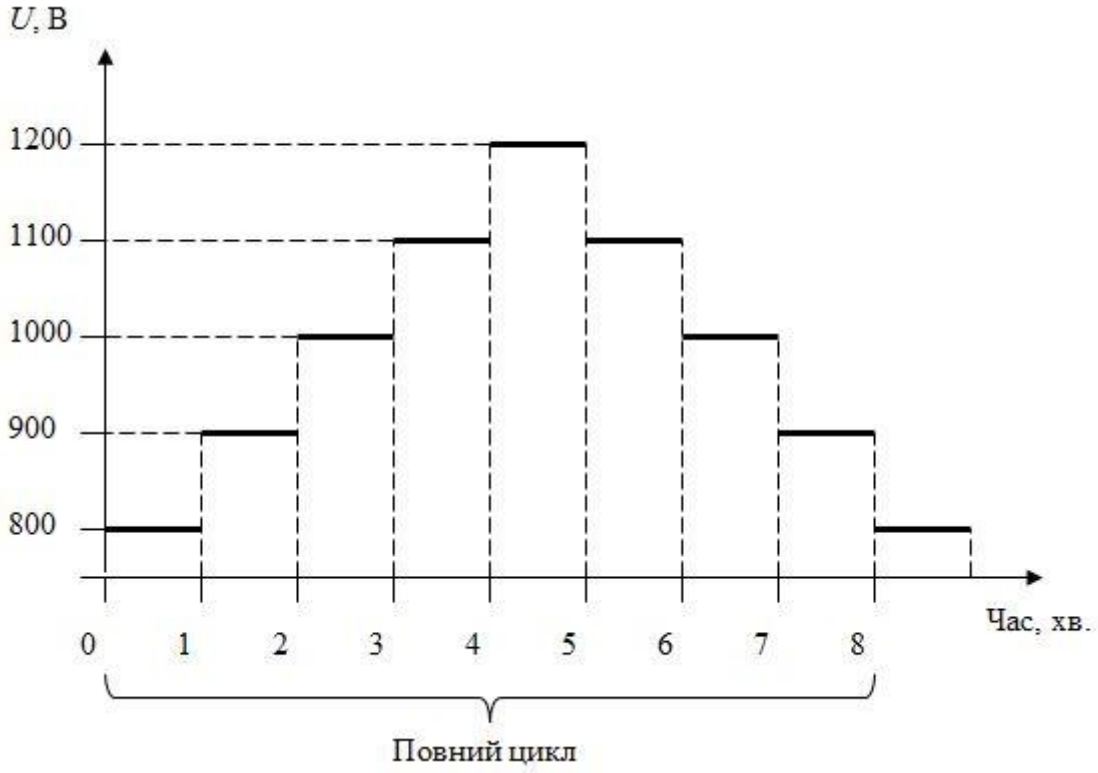


Рис. 2. Циклограма рівня вихідної напруги

Таблиця 2

Технічна характеристика блока керування

Параметр	Значення
1. Напруга живлення, В	10…30
2. Вихідна напруга, В	800…1200
3. Струм обмеження, А	10^{-3}

Блок обробки оливи вбудовується в систему змащування двигуна між блоком циліндрів і фільтром оливи, а саме встановлюється на місце фільтра оливи, а фільтр кріпиться на відповідному посадковому місці блока обробки (рис. 3, а). Блок керування монтується в кабіні машиніста, підключається до бортової мережі в коло бортового живлення через запобіжник 2 А (рис. 3, б).

а б

Рис. 3. Пристрій, змонтований на тракторі МТЗ-82:
а – блок обробки оливи в системі змащування двигуна Д-240;
б – блок керування в кабіні машиніста

Після виконання робіт з монтажу пристрою виконувались перевірки його працездатності: перевірялись наявні течії мастила по ущільненнях блока обробки, а також працездатність блока керування відповідно до встановленої програми. Після перевірки працездатності пристрій був уведений у роботу відповідно до прийнятої програми випробувань.

Програма експлуатаційних випробувань. Випробування проводились протягом чотирьох років, з січня 2018 по грудень 2021 р. Перед початком випробувань був виконаний капітальний ремонт двигуна та проведене його регламентне обкатування. Вимірювання характеристик двигуна почалось з кінця березня 2018 р.

Програма випробувань складалася з двох етапів.

Етап 1. Вимірювання характеристик двигуна і моторної оливи без вмонтованого пристрою. Вимірювання тривали до кінця грудня 2019 р. Включали періодичні вимірювання компресії в циліндрах, тиску оливи в головній магістралі та трибологічних характеристик оливи з

різним напрацюванням. Компресію і тиск оливи вимірювали під час виконання ТО із заміною оливи через кожні 300 мото-год напрацювання, при цьому вимірювали вказані характеристики як на відпрацьованій оливі перед заміною, так і на свіжій оливі після заміни. Відбір проб оливи виконували в проміжних точках напрацювання через 150 мото-год і в кінцевих точках через 300 мото-год при заміні.

Етап 2. Вимірювання характеристик двигуна і моторної оливи після монтажу та введення в експлуатацію розробленого пристрою. Вимірювання тривали до кінця грудня 2021 р. Включали періодичні вимірювання компресії в циліндрах, тиску оливи в головній магістралі та трибологічних характеристик оливи з різним напрацюванням в умовах електростатичної обробки оливи. Періодичність вимірювань і відбору проб оливи співпадала з періодичністю, встановленою на першому етапі.

Загальна хронологія виконання робіт наведена на рис. 4.

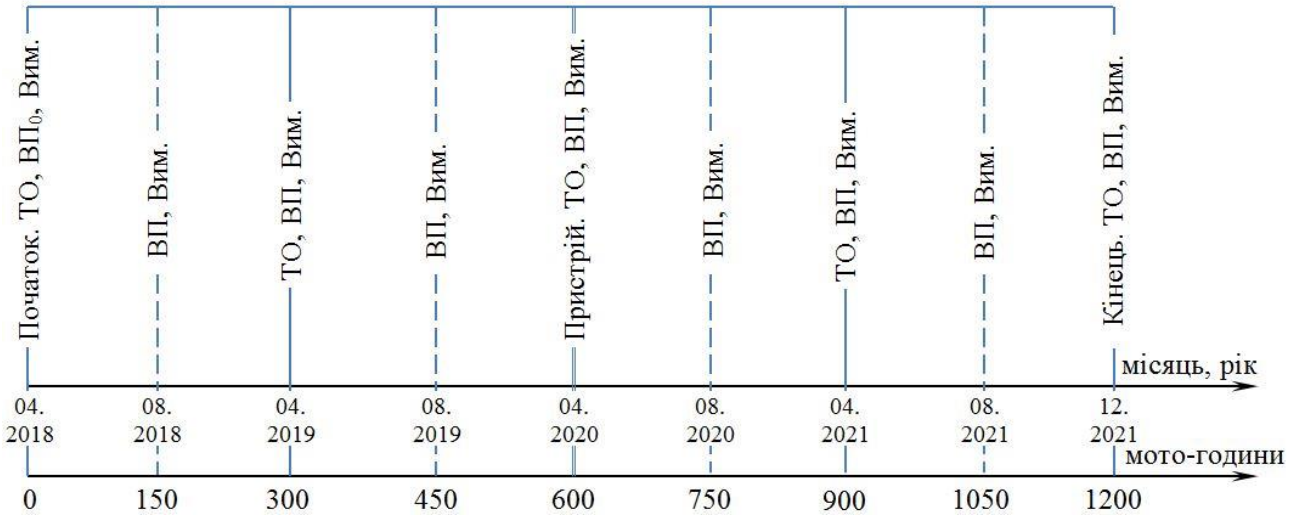


Рис. 4. Хронологія проведення випробувань:
ТО – технічне обслуговування з заміною оливи; ВП$_0$ – відбір проби свіжої оливи;
ВП – відбір проби оливи з напрацюванням; Вим. – виконання вимірювань компресії та тиску оливи

Періодичність виконання заміни оливи 300 мото-год регламентується вимогами з експлуатації машини. Фактичні значення напрацювання в кожній точці виконання робіт мають відхилення на рівні ± 20 мото-год від значень, наведених на рис. 4.

Вимірювання компресії в циліндрах двигуна та тиску оливи в головній магістралі. Під терміном компресія в статті розуміється максимальний тиск стиснення повітря в камері згорання двигуна при обертанні колінчастого вала стартером без впорскування та згорання паливної суміші. При нормальній роботі поршневих кілець (без залягання в канавках поршня) на величину компресії, окрім конструктивних параметрів, впливають ступінь зносу кілець і гільзи, а також товщина та несуча здатність граничної мастильної плівки на поверхнях контактуючих деталей. Оскільки електростатична обробка впливає саме на параметри граничної мастильної плівки, то через ці параметри вона буде впливати й на величину компресії.

Для вимірювання компресії у випробуваннях застосовувався компресометр Profline 31020-1 з діапазоном вимірювань 0–70 бар і ціною поділки в 1 бар. При максимальній нормативній компресії в циліндрах двигуна Д-240 27…28 атм обраний вимірювальний прилад має достатню точність. Вимірювання в кожній точці напрацювання двигуна виконувались за однакових умов: температура двигуна 40 °С; частота обертання колінчатого вала стартером складала приблизно 200 хв$^{-1}$.

Методика визначення компресії мала таку послідовність:

– прогрів двигуна до робочої температури 90 °С;

– зупинка двигуна та демонтаж форсунки відповідного циліндра;

– монтаж компресометра через спеціальний штуцер;

– очікування охолодження двигуна до температури 40 ±2 °С;

– вимірювання при прокручуванні стартером протягом 5 с або до завершення зростання тиску на манометрі.

Результати вимірювань компресії наведені на рис. 5, періодичність вимірювань відповідала хронології на рис. 4.

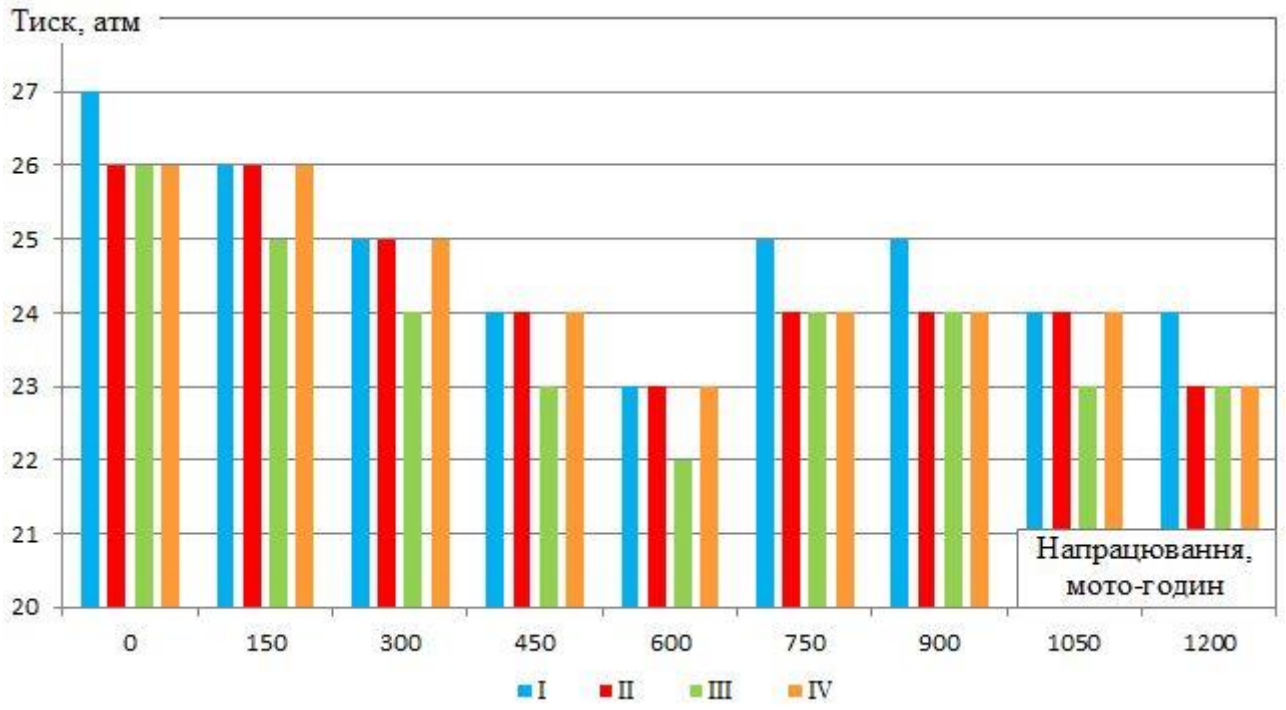


Рис. 5. Результати вимірювань компресії в циліндрах двигуна (кольором і римськими цифрами позначені номери циліндрів)

За даними рис. 5 видно, що компресія в циліндрах двигуна поступово зменшується з початку випробувань з напрацюванням машини. Так, при напрацюванні 600 мото-год середня компресія зменшилася з 26,25 до 22,75 атм. Цей темп зменшення компресії відповідає роботі трактора в штатному режимі без вмикання пристрою. При вмиканні пристрою, що відбулося по закінченню ТО на 600 мото-год, динаміка зміни компресії дещо інша. Проміжні вимірювання на напрацюванні 750 мото-год показали збільшення компресії з 22,75 до 24,25 атм. Таке збільшення говорить про формування на поверхнях більш товстої граничної мастильної плівки з підвищеною несучою здатністю. Подальше напрацювання машини призводить до

повільного зменшення компресії, але темп такого зменшення нижчій, ніж при роботі машини без електростатичної обробки оливи. Уповільнення темпу зменшення компресії пов'язано, на нашу думку, з уповільненням зношування деталей циліндро-поршневої групи двигуна при застосуванні електростатичної обробки моторної оливи, що узгоджується з результатами попередніх досліджень.

Окрім деталей циліндро-поршневої групи відповідальними деталями двигуна, знос яких залежить від мастильної здатності моторної оливи, є підшипники ковзання кривошипно-шатунного та газорозподільного механізмів. Ці підшипники працюють більшу частину часу в умовах гідродинамічного мащення, а їхній підвищений знос має місце при граничному мащенні в моменти пуску та зупинки двигуна. Зі зношуванням деталей, особливо вкладишів, поступово зростає зазор у підшипнику, як наслідок, зменшується рівень тиску оливи в головній напірній масляній магістралі. Саме тому у випробуваннях виконувались вимірювання цього тиску як опосередкованого критерію рівня зношування вказаних деталей двигуна.

Для вимірювання тиску оливи в головній магістралі застосовувався манометр вібростійкий, за ДСТУ EN 837-1:2004, з діапазоном вимірювань 0 – 6 бар, ціною ділення 0,1 бар і відносною похибкою 1,6 %. Частота обертання колінчастого вала контролювалась цифровим контактним тахометром DT-2235B з діапазоном вимірювань 5…20000 $хв^{-1}$, дискретністю 0,1 $хв^{-1}$ і відносною похибкою 0,05 %. Вимірювання в кожній точці напрацювання двигуна виконувались за однакових умов: температура двигуна 90 °С; номінальна частота обертання колінчастого вала 2500 $хв^{-1}$; частота обертання колінчастого вала на холостих обертах 800 $хв^{-1}$.

Методика визначення тиску оливи мала таку послідовність:

– прогрів двигуна до робочої температури 90 °С;

– налаштування на робочому двигуні обертів холостого ходу колінчастого вала на рівень 800±10 $хв^{-1}$;

– вимірювання тиску оливи на холостому ходу;

– налаштування на робочому двигуні обертів колінчастого вала на рівень 2500±20 $хв^{-1}$;

– вимірювання тиску оливи на номінальних обертах.

У точках напрацювання машини, у яких виконували заміну оливи, тиск вимірювався двічі – на відпрацьованій і свіжі оливі. Результати вимірювань тиску в головній магістралі наведені на рис. 6, періодичність вимірювань відповідала хронології на рис. 4. У точці з напрацюванням 600 мото-год тиск відпрацьованої і свіжої оливи вимірювався до включення пристрою в роботу.

Аналіз отриманих даних, наведених на рис. 6, дозволяє стверджувати, що тиск оливи протягом напрацювання машини поступово зменшується як для свіжої оливи, так і оливи з напрацюванням. Це пов'язано в тому числі зі зростанням зазорів у підшипниках ковзання двигуна внаслідок зношування поверхонь тертя. Максимальні значення тиску отримані для свіжої оливи на номінальних обертах вала (рис. 6, крива 2), мінімальні – для відпрацьованої оливи на холостих обертах (рис. 6, крива 3).

Зменшення тиску оливи з напрацюванням, порівняно зі свіжою оливою за однакових обертів, пояснюється зменшенням в'язкості оливи, особливо для точок виконання ТО-300, 600, 900 та 1200 мото-год, які відповідають повному відпрацюванню оливою свого призначеного ресурсу.

Легко побачити, що після введення в роботу пристрою для електростатичної обробки характер зміни тиску оливи в часі змінюється в бік падіння швидкості зменшення тиску (рис. 6, криві 1-4), починаючи з напрацювання 750 мото-год. Одночасно з цим відмічається інше явище, а саме певне збільшення тиску за однакових умов після 150 год роботи пристрою. Таке

явище, на нашу думку, пов'язане з трьома процесами: зростання товщини граничної мастильної плівки на поверхнях тертя; зростання в'язкості моторної оливи та зменшення інтенсивності зношування деталей тертя внаслідок дії на оливу електростатичного поля. Такі міркування не суперечать результатам попередніх досліджень, наведених у роботах [1-3].

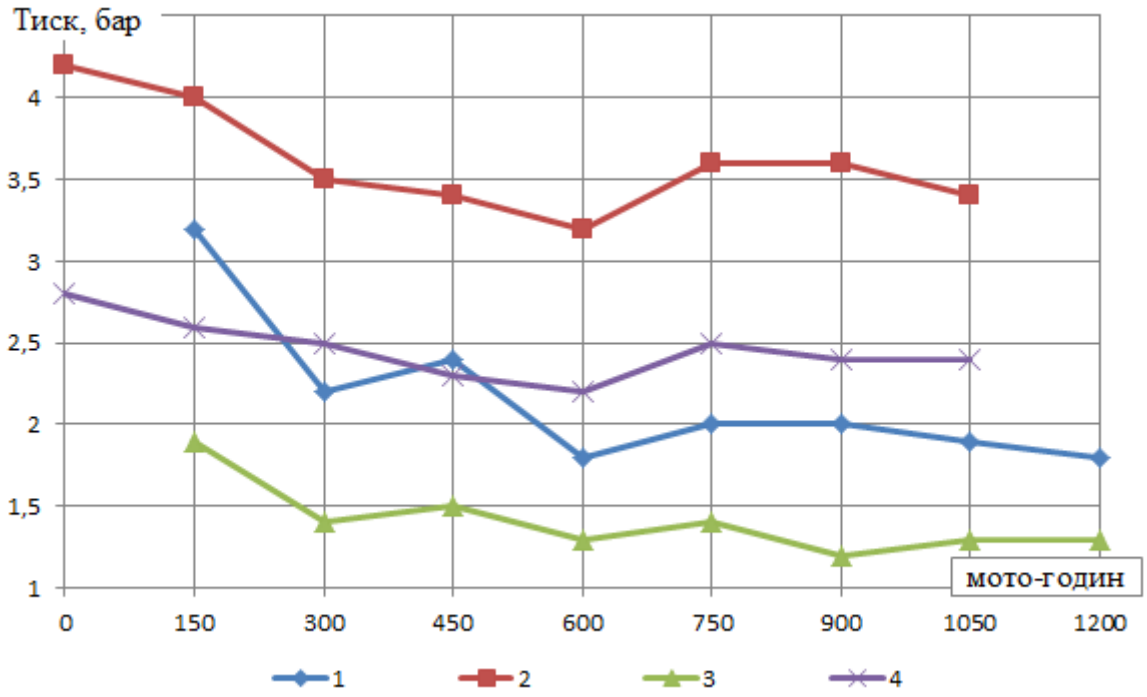


Рис. 6. Результати вимірювань тиску оливи в головній магістралі двигуна:
1 – олива з напрацюванням на номінальних обертах; 2 – свіжа олива на номінальних обертах;
3 – олива з напрацюванням на холостих обертах; 4 – свіжа олива на холостих обертах

Оцінка трибологічних характеристик моторної оливи. Паралельно з вимірюваннями характеристик двигуна випробування передбачали відбір проб оливи, лабораторний аналіз трибологічних характеристик цих проб, а також випробування моделей деталей тертя на зносостійкість при змащуванні моторною оливою з різним напрацюванням у двигуні. У цій статті зупинимося на обговоренні результатів лише лабораторного аналізу трибологічних характеристик проб оливи.

Випробування проводились за методикою, наведеною в ГОСТ 9490. Цей нормативний документ регламентує визначення чотирьох показників трибологічних характеристик оливи: середній діаметр плями зносу; критичне навантаження; індекс задиру; навантаження зварювання. У наших випробуваннях досліджувався лише середній діаметр плями зносу d_C при 196 Н як показник протизношувальної характеристики оливи. Такий вибір обґрунтований тим, що електростатична обробка оливи інтенсифікує процес фізичної адсорбції молекул присадок, тобто переважно впливає на протизношувальну властивість оливи. У випробуваннях була використана машина тертя галузевої науково-дослідної лабораторії «Хімотологічна» при кафедрі машинобудування та технічного сервісу машин Українського державного університету залізничного транспорту (рис. 7).

Рис. 7. Чотирикулькова машина тертя:
1 – електродвигун; 2 – пульт керування; 3 – місце встановлення чаші з кульками та випробувальною оливою; 4 – важіль; 5 – кінцевий вимикач двигуна; 6, 7 – захисний кожух (опора) вузла тертя і вала; 8 – набір ваг; 9 – таблиця відповідності плеча навантаження та маси ваги на важелі до навантажувального ряду з ГОСТ 9490; 10 – станина; 11 – високовольтне джерело живлення; 12 – лабораторний пристрій для обробки оливи

Головною відмінністю методики вимірювань було забезпечення в лабораторних умовах електростатичної обробки проб оливи, відібраних з машини починаючи з напрацювання 750 мото-год. Це дало змогу відтворити реальні умови роботи оливи в системі змащування дизельного двигуна, коли олива безперервно обробляється електростатичним полем. Обробку виконували в спеціальному лабораторному пристрої 12, що живиться від високовольтного джерела 11 (рис. 7).

Результати випробувань трибологічних характеристик проб моторної оливи подано у вигляді порівняльної діаграми починаючи зі зразка свіжої оливи з нульовим напрацюванням (рис. 8).

Як показали лабораторні випробування, зі зростанням напрацювання трибологічні характеристики оливи погіршуються, про що свідчить нелінійне зростання середнього діаметра плями зносу. Наприклад, для олив з максимальним напрацюванням 300 мото-год без електростатичної обробки діаметр плями зносу складає 0,61 та 0,62 мм, що в 1,69…1,72 раза більше, ніж для свіжої оливи. Це є логічним, оскільки присадки спрацьовуються та відбувається деструкція

молекул базової оливи. Це також є характерним для оливи при застосуванні електростатичної обробки, але приріст діаметра плями зносу дещо зменшується. Наприклад, при проміжному напрацюванні обробленої оливи 150 мото-год (750 та 1050 мото-год напрацювання машини) значення плям зносу складають 0,38 та 0,39 мм, а для необробленої оливи з таким самим напрацюванням – 0,45 та 0,46 мм. При максимальному напрацюванні обробленої оливи 300 мото-год (900 і 1200 мото-год напрацювання машини) значення плям зносу складають 0,56 та 0,57 мм, а для необробленої оливи з таким самим напрацюванням – 0,61 та 0,62 мм. Ці дані свідчать про уповільнення темпу погіршення протизношувальної властивості оливи при її електростатичній обробці, а також підтверджують дані попередніх випробувань щодо уповільнення темпу зношування деталей тертя двигуна.

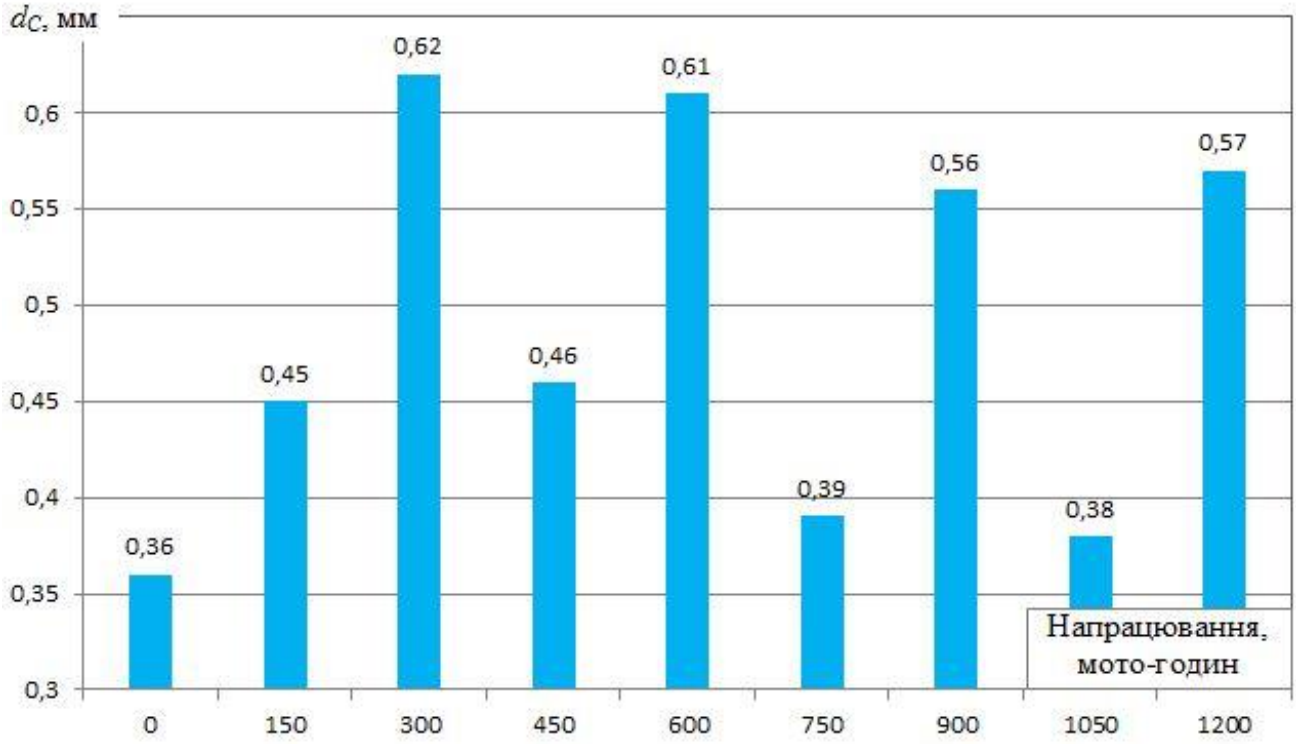


Рис. 8. Результати вимірювань середнього діаметра плями зносу кульок на чотирикульковій машині для проб оливи з різним напрацюванням

Висновки

1. Конструкція удосконаленого пристрою для електростатичної обробки, що підлягав випробуванням, передбачає наявність ступінчастого регулювання рівня вихідної напруги та обмеження величини струму в колі блока обробки, що б дало можливість підтримати раціональну напруженість електричного поля в зоні обробки оливи, а також унеможливити електричний пробій оливи, як фактор лавиноподібної деструкції молекул.

2. Електростатична обробка моторної оливи призводить до зростання компресії в циліндрах двигуна в середньому на 6,5 % і зростання тиску оливи в головній магістралі на 5…11 % залежно від напрацювання оливи у двигуні. Такі дані говорять про утворення на поверхні деталей граничної мастильної плівки зі збільшеною товщиною та несучою здатністю.

3. При введенні удосконаленого пристрою в роботу після напрацювання машини в 600 мото-год спостерігалось уповільнення темпу зменшення компресії в циліндрах і тиску оливи в головній магістралі порівняно з темпом їх зменшення при роботі двигуна в штатному режимі – від 0 до 600 мото-год, що вказує на уповільнення темпу зношування деталей циліндро-поршневої групи та підшипників ковзання двигуна.

4. Електростатична обробка позитивно впливає на трибологічні характеристики моторної оливи, а саме на її протизношувальні властивості. Встановлене зменшення діаметра плями зносу на 15 % для оливи з проміжним напрацюванням 150 мото-год і 8 % для оливи з максимальним напрацюванням 300 мото-год. Такі дані корелюються з даними щодо уповільнення темпу зношування деталей двигуна, а також опосередковано вказують на можливість збільшення строку служби оливи у двигуні, однак цей висновок потребує підтвердження шляхом досліджень повного спектра експлуатаційних властивостей оливи.

Список використаних джерел

1. Повышение ресурса технических систем путем воздействия электрическими и магнитными полями / Е. Е. Александров, И. А. Кравец, Е. Н. Лысиков и др. Харьков: НТУ «ХПИ», 2006. 544 с.

2. Воронін С. В. Розробка трибофізичних основ мастильної здатності рідкокристалічних присадок до базових олив. *Східно-Європейський журнал передових технологій.* 2015. Т. 3, № 7(75). С. 53-57. DOI: 10.15587/1729-4061.2015.44389.

3. 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.

4. Лысиков Е. Н., Воронин С. В. Повышение ресурса гидравлического оборудования путем использования электрических полей. *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії*. Краматорськ: ДДМА, 2010. № 1(18). С. 176-181.

5. Третьяков И. Г., Миронов Е. А. Исследование влияния электромагнитного поля на эксплуатационные свойства масел. *Сб. науч. тр.* Киев: КИИГА, 1989. С. 84-89.

6. Лысиков Е. Н. Влияние электростатической обработки рабочих жидкостей на интенсивность износа пар трения гидроприводов. *Вестник Харьковского государственного автомобильно-дорожного технического университета.* Харьков: РИО ХГАДТУ, 2000. Вып. 12-13. С. 75-78.

7. Investigation of electrostatic charging mechanisms in oil lubricated tribo-contacts / T. Harvey, R. Wood, G. Denuault, H. Powrie. *Tribology International.* 2002. № 35. P. 605-614.

8. Пристрій обробки рідких змащувальних матеріалів на вуглеводневій основі: пат. № 72366 Україна, МПК C10G 71/00. № u201203748; заявл. 28.03.2012; опубл. 10.08.2012, Бюл. № 15.

9. Чигринов В. Г. Ориентационные эффекты в нематических жидких кристаллах в электрическом и магнитном полях. *Кристаллография.* 1982. Т. 27. С. 404-430.

10. Поплавко Ю. М. Физика диэлектриков: учеб. пособ. для ВУЗов. Киев: Вища школа, 1980. 400 с.

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

Стефанов Володимир Олександрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри машинобудування та технічного сервісу машин Українського державного університету залізничного транспорту.
ORCID iD: 0000-0002-7947-2718. Тел.: +38(068)819-84-27. E-mail: vstef@ukr.net.
Харківський Олександр Сергійович, аспірант кафедри машинобудування та технічного сервісу машин Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-1222-9422.
Тел.: +38(050)026-48-20. E-mail: kharsanya2806@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.
Stefanov Volodymyr, PhD (Tech), associate professor, Department of Mechanical Engineering and Technical Service of Machines, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-7947-2718.
Tel. +38 (068)819-84-27. E-mail: vstef@ukr.net.
Kharkivskyi 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.

Статтю прийнято 14.06.2022 р.

ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКА (144)

УДК 581.9:504.54

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ СПАЛЮВАННЯ БУРОГО ВУГІЛЛЯ У ВИХРОВІЙ ТОПЦІ ШЛЯХОМ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Д-р техн. наук І. О. Редько, асистенти Ю. О. Бурда, Ю. О. Півненко, асп. Р. Л. Джиоєв

RESEARCH OF BROWN COAL BURNING PROCESSES IN THE VORTEX FIREPLACE BY COMPUTER MODELING

Dr. Sc. (Tech.) I. Redko, assistant Y. Burda, assistant Y. Pivnenko, postgraduate student R. L. Dzhyoiev

DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.200.2022.262683

Анотація. *Використання в паливному балансі України дорогого імпортованого природного газу стимулює розвиток промислової та малої енергетики на основі дешевих місцевих палив і горючих відходів. Використання дешевого вугілля, торфу, деревних відходів дозволяє знизити собівартість вироблення теплоти на підприємствах житлово-комунального господарства, промислових підприємствах. Наведено результати спалювання бурого вугілля у вихровій топці (ТЗЗП) для різних теплових схем і режимів спалювання.*

Ключові слова: *буре вугілля, комп'ютерне моделювання, технології спалювання, вихрова топка.*

Abstract. *As part of the course for European integration in Ukraine, a new Energy Strategy was approved to reduce the share of coal among primary sources to 12.5 % by 2035, the share of electricity generation at TPPs and CHPs to 3 2%. In 2021, Ukraine joined the EU's Green Deal strategy with a commitment to completely stop coal production and close coal energy and close coal energy by 2050.*

At the same time, coal energy has advantages - significant reserves of domestic coal (first in Europe and eighth in the world), which make it a guarantor of energy independence.

Given the growing share of "green" generation in Ukraine, the share of pulverized coal production should be kept at least 30% of total energy production

The use of expensive imported natural gas in Ukraine's fuel balance stimulates the development of industrial and small energy based on cheap local fuels and combustible waste. The use of cheap coal, peat, wood waste can reduce the cost of heat production in housing and communal services, industrial enterprises.

Combustion of low-grade fuels is constrained due to the complexity of organizing a sustainable combustion process.

Local fuels are characterized by high humidity and ash content, low heat of combustion. The zone of autogenous (self-sustaining) combustion is defined by the limits: combustible - more than 25 %, moisture - less than 50 %, ash - less than 60% by working weight.

Vegetation and wood are the starting point for the stages of metamorphism (carbonization): plant residues, peat, brown coal, coal, anthracite.

Characteristics of humolites, the organic part of the fuel, by stages of metamorphism. Fuels of different types and different degrees of carbonization - peat, lignite is peroxidized and contain a lot of oxygen in the combustible mass, have the lowest thermal stability and the highest yield of volatile substances.

In the process of metamorphism, oxygen is removed and the thermal stability of the organic matter of the fuel is increased.

Keywords: *lignite, computer simulation, combustion technology.*

Вступ. У рамках курсу на євроінтеграцію в Україні затверджена нова Енергетична стратегія з метою зниження до 2035 року частки вугілля серед первинних джерел до 12,5 %, частки вироблення електроенергії на ТЕС та ТЕЦ – до 32 %. У 2021 році Україна приєдналась до стратегії Євросоюзу «Green Deal» із зобов'язанням повного припинення видобутку вугілля та закриття вугільної енергетики до 2050 року.

При цьому вугільна енергетика має переваги – значні запаси вітчизняного вугілля (перше місце в Європі та восьме у світі), що роблять його гарантом енергетичної незалежності.

В умовах зростання «зеленої» генерації в Україні частку вироблення пиловугільних ТЕС слід утримувати на рівні не менше 30 % загального вироблення енергетики.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Використання в паливному балансі України дорогого імпортованого природного газу стимулює розвиток промислової та малої енергетики на основі дешевих місцевих палив і горючих відходів. Використання дешевого вугілля, торфу, деревних відходів дозволяє знизити собівартість вироблення теплоти на підприємствах житлово-комунального господарства, промислових підприємствах [1].

Спалювання низькосортних палив стримується через складність організації сталого топкового процесу.

Місцеві палива характеризуються високою вологістю і зольністю, низькою теплотою згорання. Зона автогенного (самопідтримуваного) горіння визначена межами: горючих – понад 25 %, вологи – менше 50 %, золи – менше 60 % за робочою масою.

Рослинність і деревина є вихідною позицією за стадіями метаморфізму (вуглефікації): рослинні залишки, торф, буре вугілля, кам'яне вугілля, антрацит [2-3].

Характеристики гумолітів, органічної частини палива за стадіями метаморфізму наведено в табл. 1. Палива різних типу і ступеня вуглефікації – торф, буре вугілля - переокиснені і містять у горючій масі багато кисню, мають найменшу термічну стійкість і найбільший вихід летких речовин [4].

У процесі метаморфізму видаляється кисень і підвищується термічна стійкість органічної речовини палива (табл. 1).

Таблиця 1

Зміна складу палива за стадіями вуглефікації

Паливо	Склад органічної маси, %				Температура початку поділу, °С	Вихід летких, %
	С	Н	О	N	t_o, °С	V^{daf}, %
Торф	60-65	5-6	33-38	0,5-1,5	160	70
Буре вугілля	64-77	5-6	15-25	0,5-1,5	230-260	35-50
Кам'яне вугілля	75-90	5-6	4-15	0,5-1,5	300-340	12-45
Антрацит	94-97	1-2	2-4	0,5-1,5	230	4-7

Енергетичний потенціал біомаси становить 23 млн т н. е./р. (дані 2018 рік), у тому числі деревна біомаса становить 3,08 млн т н. е./р.

Оцінка запасів та енергетичного потенціалу бурого вугілля та торфу в Україні. В Україні є великі запаси бурого вугілля. Україна посідає сьоме місце серед світових родовищ бурого вугілля (після США, Росії, Китаю, Індії, Німеччини, Казахстану) і перше місце в Європі [5].

Родовища бурого вугілля зосереджені в Донецькому, Львівсько-Волинському та Дніпровському вугільних басейнах. Карта родовищ наведено на рис. 1.

Рис. 1. Карта вугільних басейнів України

В Україні є 77 родовищ бурого вугілля (з них 42 у Кіровоградській області та 21 у Дніпропетровській області) із запасами понад 2904,3 млн т, з яких 0,5 млрд т придатні для відкритої розробки. Потужність вугільних пластів досягає 25 м, середня – 3-4 м. Глибина залягання вугілля – від 5 до 160 м. За ступенем метаморфізму вугілля належить до групи Б1 (м'яке буре вугілля). Вологість вугілля 55-60 %, зольність – 15-25 %, вміст сірки – 2,3-3 %. Найнижча теплота згорання вугілля – менше 25 МДж/кг.

Обсяг видобутку вугілля у Львівсько-Волинському басейні становить близько 14 млн т/р. [6].

У Дніпровському вугільному басейні (що включає Житомирську, Вінницьку, Черкаську, Кіровоградську, Дніпропетровську та Запорізьку області) зосереджено понад 200 родовищ, розробка яких ведеться відкритим способом. Основними центрами видобутку бурого вугілля є міста Ватутіне (Черкасська область) та Олександрія (Кіровоградська область). Останніми роками значні запаси бурого вугілля (більше 400 млн т) виявлено за межами Українського щита – на території Харківської області [7-9].

Родовища бурого вугілля в північно-західній частині Донецького вугільного басейну (Харківська область): Бантишевське, Ново-Дмитрівське, Берекське, Степківське, Лозовеньківське, Біляївське, Миронівське.

Запаси бурого вугілля Ново-Дмитрівського родовища становлять 1,2 млрд т при Квск. менше 2 $м^3/т$. Розглядається питання розробки Ново-Дмитрівського родовища бурого вугілля в Барвінківському районі Харківської області [10-12].

Видобуток бурого вугілля ведеться на родовищі бурого вугілля – Мокрокалигорське (Черкаська область), планова продуктивність якого становить 300-600 тис. т/р. Буре вугілля містить 65-70 % вуглецю; зольність – до 12 %; вихід летких – 31,3 %; калорійність – 5539 ккал/кг (23263,8 кДж/кг).

Відповідно до стандартів України ДСТУ 3472-96 до бурого вугілля належить вугілля з $R_o < 0{,}40$ %, $V^{daf} = 50 - 70$ % та $Q_{\text{н}}^{\text{р}} < 24$ МДж/кг.

На Олександрійському родовищі видобували близько 10 млн т бурого вугілля. У 1976 році видобули 11722 тис. т, 4079,7 тис. т паливного буровугільного брикету [13-15].

У західних областях України видобуток бурого вугілля становив: Закарпаття – 400 тис. т, Львівська область – 454 тис. т, Івано-Франківська область – 68 тис. т.

Потенціал видобутку вугілля підприємствами буровугільного комплексу на період до 2047 року. Видобуток бурого вугілля дозволяє збільшити видобуток вуглеводнів на понад 5 млн т нафтового еквівалента на рік. При цьому економія при заміні газу становить близько 995 млн дол./р.

Найперспективнішими є запаси для відкритого видобутку на територіях Кіровоградської, Дніпропетровської, Харківської та Полтавської областей. Найбільш перспективними є Олександрійський буровугільний район і Ново-Дмитрівське бурокутне родовище Харківської області. Потенціал видобутку бурого вугілля показує, що бюджетна ефективність може становити близько 250 млн дол./р.

Поряд із бурим вугіллям Україна має значні запаси торфу.

Заторфованість Рівненської та Волинської областей сягає 6,5 %, Тернопільської, Полтавської, Сумської, Харківської не перевищує 2 % усієї території [16-18].

За даними Держкомгеології, на території України розвідано 3118 торф'яних родовищ із геологічними запасами близько 2,2 млрд т. Загальна площа родовищ близько 3 млн га (табл. 2).

Таблиця 2

Енергетичний потенціал торфу в областях України

Область	Енергетичний потенціал, млн МВт·год
Вінницька	136,4
Волинська	1370,1
Дніпропетровська	0,25
Житомирська	290,5
Івано-Франківська	452
Київська	716,5
Львівська	690,6
Миколаївська	126
Полтавська	364,3
Рівненська	1176,2
Сумська	331,2
Тернопільська	304,3
Харківська	15,7
Хмельницька	236
Черкаська	192
Чернігівська	818,5

В Україні обсяг розвіданих родовищ торфу становить близько 1160 млн т. Найбільші родовища зосереджені в Рівненській області (330 родовищ), Волинській (226 родовищ), Чернігівській (198 родовищ), Житомирській (187 родовищ) [19-20].

Торф'яне родовище Закльовщина (Заріченський район Рівненської області [21]) має потужність покладу 1,2 м і середню зольність торфу 16 % (табл. 3).

Таблиця 3

Обсяги видобутку торфу (2010)

Підприємства	Обсяг видобутку, т
Волинь торф	192000
Житомир торф	17700
Київ торф	37500
Поділля торф	1200
Рівне торф	166600
Чернігів торф	44270

Торф'яні родовища: Збищене і Стобихівське (Камінь-Кщирський район Рівненської області); Вілія, Каровиця, Стеризівка (Рокитнівський район Рівненської області); Бабій Мох (Дубровський район Рівненської області) [22].

За даними роботи [23], у Харківській області розвідано шість родовищ торфу. Потужність торфу коливається від 1,1 до 1,89 м, зольність від 30,5 до 41,0 %. Загальні запаси шести торфу складає 952,7 тис. т.

В Україні працювало 37 торфо-брикетних заводів (1991 рік), у 2010 році їх залишилося шість.

Брикети – найбільш збагачений вид торф'яного палива. Висока природна вологість торфу (75-80 %) знижується до 40-50 % під час польового сушіння на технологічних майданчиках видобутку і до 14-18 % у процесі штучного сушіння на брикетних заводах [24]. Найнижча теплота згорання торфобрикетів становить 16-17 МДж/кг, зольність – менше 15 %, насипна щільність – близько 700 кг/м^3.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою цієї роботи є комп'ютерний аналіз і перевірка ефективності спалювання бурого вугілля у вихровій топці (ТЗЗП) для різних теплових схем і режимів спалювання.

Для досягнення сформульованої мети необхідно виконати аналіз дисперсного складу бурого вугілля, провести аналіз структури та режимів аеродинамічних процесів і визначити конструктивні параметри й показники якості дослідженого ТЗЗП.

Основна частина дослідження. Дисперсний склад бурого вугілля подано на рис. 2 гістограмою розподілу масових частинок вугілля за їхніми розмірами та зерновою характеристикою (рис. 2-3). Пил характеризується такими залишками на ситах: R90 = 17 %, R200 = 2,5 % і є пилом тонкого помелу.

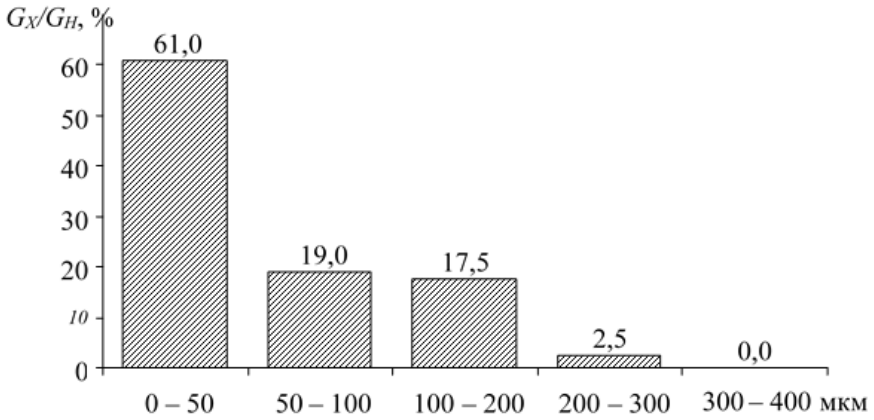


Рис. 2. Розподіл масових частинок вугілля за їхніми розмірами

1. Склад бурого вугілля:

Технічний склад (на робочу масу):

$A^p = 20\ \%, W^p = 30\ \%, V^p = 25\ \%$ (варіант 1): $A^p = 35\ \%, W^p = 30\ \%, V^p = 30\ \%$ (варіант $2 - limit$).

A_p 20 %;

W_p 30 %;

V_p 25 %.

Елементарній склад (на горючу масу):

C_r 70 %;

H_r 5 %;

O_r 22,5 %;

N_r 1 %;

S_r 1,5 %.

2. Фізичні властивості бурого вугілля:

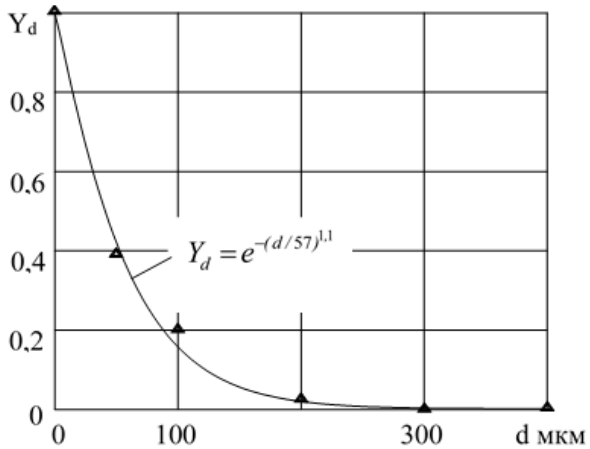
густина 1250кг/м^3;

питома теплоємність 1190 Дж/(кг·К);

вища теплота згорання (на робочу масу) 13,9 МДж/кг;

стехіометричний коефіцієнт 4,3 кг повітря/кг палива;

температура виходу летких 160 °С.



Δ – експериментальні значення

Рис. 3. Інтегральні зернові характеристики вугільного пилу

Аналіз результатів розрахунків, наведених у табл. 1, показує таке: на вході в топку при згоранні торфу температура топкових газів досягає значення 1952 °С, мінімальна частка кисню становить 0,5 %. При змішуванні з вторинним повітрям температура в об'ємі топки знижується до 1300-1450 °С, і при цьому масова доля кисню становить 5,2 % на виході з топки. При русі газів у димовій трубі 0 вони нагріваються і на виході з топки температура становить 1711 °С. Температура золи, що видаляється вздовж стінки топки, становить 1380 °С. Випаровування вологи та вихід летких, їх згорання призводить до того, що максимальна абсолютна швидкість газів досягає 372 м/с у верхній частині топки і знижується до значень 150-170 м/с у середній зоні топки, у зоні факела. Вторинне повітря подається з високою швидкістю, що забезпечує рівномірне заповнення факела в обсязі топки, а отже, при цьому зростає час перебування коксових частин у топці [25].

Аналіз траєкторій руху частинок показує, що частинки діаметром 25 мкм потрапляють у висхідний потік топкових газів і виносяться з топки, а частинки діаметром 250 мкм осідають у нижній частині топки. Леткі вигорають із частинок діаметром 25 і 250 мкм. Кокс (порошковий нелеткий залишок – вуглець і мінеральна частина) вигорає з частинок діаметром 25 мкм. Залежно від діаметра частинок кокс вигоряє по-різному: кокс із частинок з початковим діаметром до 200 мкм вигорає повністю; кокс із частинок початковим діаметром 250 мкм у складі дрібнодисперсного пилу від 25 до 250 мкм вигорає на 96 %; кокс із частинок з початковими діаметрами 100, 325 і 550 мкм у складі грубодисперсного пилу від 100 до 1000 мкм вигорає на 79, 35 і 5 % відповідно; кокс із частинок із початковими діаметрами більше 775 мкм у складі грубодисперсного пилу від 100 до 1000 мкм практично не вигорає [26].

На траєкторію руху частинок у топці впливають вихід вологи і летких частинок палива. Волога видаляється на вході в топку у верхній частині, концентрація дрібних частинок висока в нижній зоні топки, а великі частинки концентруються у верхній зоні топки. Леткі виділяються з дрібних частинок (25 мкм) на вході в топку, і концентрація їх збільшується в нижній зоні топки, а великі частинки концентруються у верхній зоні топки, тому що вихід летких з них більш повільний [27].

Отже, волога виділяється з частинок на вході в топку у верхній зоні та видаляється з топковими газами (близько 52 %). Зола дрібних частинок видаляється з топки разом із топковими газами, а зола великих частинок уловлюється і видаляється в бункер у нижній зоні топки (44,3–47,6 %) [28, 29]. Леткі згорають повністю (100 %), а тверді частинки мають механічний недопал (до 0,06 %), винос золи 52 % масштабування топки шляхом збільшення її геометричних розмірів в 1,83 раза та номінальної теплової потужності втричі (варіант 2) призводять до зниження кінцевої температури золи до 1000 °С і зниження механічного недопалу; зниження теплового навантаження до 50 та 15 % (варіанти 3, 4) призводить:

1) до зниження температури газу на виході на 1,6 і 9 % відповідно;

2) зниження кінцевої температури золи до 1330 і 1280 °С відповідно;

3) зниження виносу золи до 56 і до 80 % відповідно.

Висновки. Охолодження корпусу топки (варіант 5) ($t_{ст}$ = 120 °С) призводить до зниження температури газів до 704 °С, ступінь вигорання коксу з частинок, що виносяться, становить 61,8 %, з частинок, що вловлюються, – 28,6 %.

Аеродинамічна структура топкової сфери визначається швидкістю руху газів. На вході в топку абсолютна швидкість паливно-повітряної суміші становить 100-110 м/с. Вища швидкість газів (до 150-170 м/с) за перетином топки спостерігається поблизу стін топки. На осі топки утворюється зона з низькою швидкістю

руху газів (до 20-30 м/с). На виході з топки швидкість газів становить близько 200 м/с. Як видно, аеродинамічна структура визначається траєкторією руху частини палива. Маса дисперсного матеріалу (частини палива) обертається по висоті топки та рухається до вихідного патрубка. Концентрація частини змінюється за висотою топки, при цьому збільшується у верхній частині через подачу зустрічного потоку вторинного повітря. Це обмежує висоту топки та дозволяє зменшити її об'єм.

Аналіз структури та режимів аеродинамічних процесів у топці вказує на те, що їх можна визначити як режими киплячого шару, що обертається (SFB). Процеси обертання частини в киплячому шарі забезпечують вищу турбулізацію та інтенсивність термохімічних процесів горіння палива.

Розподіл температури в топковому об'ємі визначається процесом горіння твердих частинок і залежить від вологості та зольності палива. Леткі палива швидко згорають у нижній зоні топки. Швидкість утворення золи висока і потребує її видалення, а швидкість виділення вологи нижча, що обмежує процес горіння. Ці процеси визначають розподіл температури середовища в топковому об'ємі. Показано, що спостерігається ізотермічний розподіл температури по висоті топкового об'єму. При цьому об'ємне тепловиділення становить 2500 кВт/м^3.

Траєкторія руху частини палива впливає на розподіл температури в об'ємі топки. Висока швидкість газів на периферії (біля стін) топки створює умови виносу частинок, і горіння відбувається у пристінковій зоні. Частинки з діаметром 25 мм рухаються вгору в топці. Ступінь вигорання становить 100 %. Більші частинки з діаметром 250 мм знаходяться в топці більше 2 с, згорають і видаляються з топки. Для їх повного вигорання можливе їх повернення в режим циркуляції.

Основна проблема, що виникає в процесі спалювання вугілля при нижній подачі палива, – це тривале витання частинок золи у верхній зоні топки, збільшення їхньої концентрації, складність видалення та порушення процесу горіння (табл. 4).

Таблиця 4

Конструктивні параметри й показники якості дослідженого ТЗЗП

Параметр, одиниця вимірювання	Варіант печі					
	1	2	3	4	4a	4a-limit
1	2	3	4	5	6	7
D_a, мм	600	600	600	600	600	600
H, мм	3645	3645	3645	3645	3645	3645
$G_{пал}$, кг/с	0,184	0,184	0,184	0,184	0,184	0,2575
$W_н$, МВт	2,55	2,55	2,55	2,55	2,55	2,5
$G_{пов.1}$, кг/с	1,26	1,26	1,26	1,325	1,325	1,325
$t_{пов.1}$, °С	377	377	377	377	377	377
$G_{пов.2}$, кг/с	0,315	0,315	0,315	0,25	0,25	0,25
$t_{пов.2}$, °С	377	377	377	377	377	377
$G_{пов.Σ}$, кг/с	1,575	1,575	1,575	1,575	1,575	1,575
$\overline{Q}_{пов.1}$, %	80	80	80	84	84	84
$\overline{Q}_{пов.2}$, %	20	20	20	16	16	16
α_1	1,58	1,58	1,58	1,67	1,67	1,66
$\alpha_Σ$	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	1,97

Продовження табл. 4

1	2	3	4	5	6	7
$d_{ч.мин}$, мкм	25	25	25	25	25	25
$d_{ч.макс}$, мкм	250	250	250	250	250	250
$\bar{d}$, мкм	57	57	57	57	57	57
n	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
$t_{г.вих}$ °С	1888	1801	1908	1919	1870	1966
$q_{O2.вих.сер}$, %	3,4	3,2	3,2	3,2	3,8	1,1
Ступінь вигорання летких, %	100	100	100	100	100	100
Ступінь вигорання коксу з частинок, що виносяться, %	-	100	100	100	100	-
Ступінь вигорання коксу з частинок, що вловлюються, %	93,9	81,4	100	92,5	83,8	34,4
Ступінь вигорання коксу з частинок, що витають (накопичуються всередині ТЗЗП), %	-	100	100	100	100	100
Недопал механічний частинок, що виносяться, % (горючої маси)	-	0	0	0	0	-
Недопал механічний частинок, що вловлюються, % (горючої маси)	3,04	9,3	0	3,7	8,1	9,4
Недопал механічний частинок, що витають (накопичуються всередині ТЗЗП), % (горючої маси)	-	0	0	0	0	0
Уловлювання частинок, %	100	0,6	0,4	0,8	99,4	99,6
Винос частинок, %	0	19,4	19,6	19,2	0,4	0
Витання (накопичення всередині ТЗЗП) частинок, %	0	80	80	80	0,2	0,4

Список використаних джерел

1. Енергетичний потенціал біомаси в Україні. Київ: Видав. Центр НУБіП України, 2011. 28 с.

2. Гелетуха Г. Г. Науково-технічні засади виробництва енергії з біологічних видів палива: дис. … д-ра техн. наук. Київ: ІТТФНАНУ, 2021. 332 с.

3. Баскаков А. П., Мацнев В. В., Распопов І. В. Котлы и топки с кипящим слоем. Москва: Энергоатомиздат, 1995. 349 с.

4. Махорін К. Е., Хінкіс П. А. Спалювання палива в псевдозрідженому шарі. Київ: Наукова думка, 1989. 204 с.

5. Кучин Г. П., Скрипко В. Л., Урда Н. Н. Спалювання низькотемпературних палив у псевдозрідженому шарі. Київ: Техніка, 1987. 144 с.

6. Бородуля В. А., Виноградов Л. М. Сжигание твердого топлива в псевдосжиженном слое. Минск: Наука и техника, 1980. 192 с.

7. Опыт сжигания разных видов биомассы в России и Белоруссии / Г. А. Рябов, Д. С. Литун, Е. А. Пиццуха и др. *Электрические станции*. 2015. № 9. С. 9-17.

8. Карапетов А. Шаровое сжигание биотоплива. *Обзор технологий. Ленпроинформ.* 2016. № 1 (115). 110 с.

9. Ісьємін Р. Л. Котел, що працює на низькотемпературному твердому паливі. *Житлове та комунальне господарство*. 2005. № 3. С. 36-37.

10. Пузырев Э. М. Исследование топочных процессов и разработка котлов для низкотемпературного сжигания горючих отходов и местных топлив: дис. … д-ра техн. наук. Барнаул, 2003. 120 с.

11. Научные основы создания высокоэффективных топочных устройств для котлов, работающих на твердом биотопливе: дис. … д-ра техн. наук. Минск, 2019. 110 с.

12. Особенности процессов сжигания биотоплива в котлах из КШ / Г. А. Рябов и др. *Теплоэнергетика*. 2005. № 9. С. 54–60.

13. Водогрійні котли з киплячим шаром і шаром палива, що інтенсивно продувається, для спалювання низькотемпературного вугілля та біомаси / Р. Л. Ісьємін, С. Н. Кузьмін, В. В. Коняних та ін. *Новини теплопостачання.* 2008. № 5 (93). С. 57-63.

14. Вавилов В. И. Эффективное сжигание низкосортных углей в двухъярусной топке. *Безопасность жизнедеятельности*. 2009. № 6. С. 23–27.

15. Саламатов В. В. Научные основы создания и малозатратной реконструкции угольных пароагрегатов под вихревую технологию сжигания. *Известия Томского политехнического университета.* 2014. № 4 (324). С. 25–38.

16. Redko A., Burda Yu., Dzhyoiev R., Redko I., Norchak V., Pavlovskiiy S., Redko O. Numerical Modeling of Peat Burning Processes in a Vortex Furnace with Countercurrent Swirl Flows. *Thermal science.* 2020. URL: https://doi.org/10.2298/TSCI190305158R.

17. Pivnenko, Y., Burda, Y., Redko, I., Cherednik, A., Alferov, S. Optimization of geometrical parameters of fire wood fluidized bed burner. *Problems of the Regional Energeticsthis link is disabled*. 2021. Vol. 2. P. 49-59.

18. QinYan and other. Hourly emission estimation of black carbon and brown carbon absorption from domestic coal burning in China. *Science of The Total Environment.* 25 March 2022. Vol. 814. URL: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151950.

19. XingruLi and other, Light absorption properties of black and brown carbon in winter over the North China Plain: Impacts of regional biomass burning Atmospheric *Environment*. 1 June 2022. Vol. 278. URL: https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.119100.

20. Glushkova D. O., Matiushenkob A. I., Nurpeiisa A. E., Zhuikov A. V. An experimental investigation into the fuel oil-free start-up of a coal-fired boiler by the main solid fossil fuel with additives of brown coal, biomass and charcoal for ignition enhancement. *Fuel Processing Technology*. 1 December 2021. Vol. 223. 106986. URL: https://doi.org/10.1016/j.fuproc. 2021.106986.

21. Margarita A., KurgankinaGalina S., NyashinaPavel A. Advantages of switching coal-burning power plants to coal-water slurries containing petrochemicals. *Applied Thermal Engineering*. 25 January 2019. Vol. 147. P. 998-1008. URL: https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng. 2018.10.133.

22. Stolboushkina A. Yu. Ivanova A. I. Fominab O. A. Use of Coal-Mining and Processing Wastes in Production of Bricks and Fuel for Their Burning. *Procedia Engineering.* 2016. Vol. 150. P. 1496-1502. URL: https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.089.

23. Joana Ribeiroa, IsabelSuárez-Ruizb, Colin R. Wardc, DeolindaFloresa, Petrography and mineralogy of self-burning coal wastes from anthracite mining in the El Bierzo Coalfield (NW Spain).

International Journal of Coal Geology. 15 January 2016. Vol. 154–155. P. 92-106. URL: https://doi.org/10.1016/j.coal.2015.12.011.

24. Md. Ahosan Habibac, Rahat Khanb, Khamphe Phoungthonga, Evaluation of environmental radioactivity in soils around a coal burning power plant and a coal mining area in Barapukuria, Bangladesh: Radiological risks assessment. *Chemical Geology.* 30 June 2022. Vol. 600. 120865. URL: https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2022.120865.

25. Miriel J. et al. Radiant ceiling panel heating-cooling systems: experimental and simulated study of the performances, thermal comfort and energy consumptions. *Appl Therm Eng*. 2002. Vol. 22 (16). P. 1861-1873.

26. Fonseca N. Experimental analysis and modeling of hydronic radiant ceiling panels using transient-state analysis. *Int. J. of Refrigeration*. 2011. Vol. 34. P. 958-967.

27. Strand R. K. et al. Modeling radiant heating and cooling systems: integration with a whole-building simulation program. *Energy and Building*. 2005. Vol. 37. P. 389-397.

28. Tye-Gingras M. et al. Investigation on heat transfer modeling assumptions for radiant panels with serpentine layout. *Energy and Buildings*. 2011. Vol. 43. P. 1598-1608.

29. Kasilov P.V. Radiative-type Heat-Exchanger of Space-based Power Plant *Electronic scientific and technical periodical Science and Education*. 2011. № 13. P. 10.

Редько Ігор Олександрович, доктор технічних наук, професор кафедри теплотехніки, теплових двигунів та енергетичного менеджменту Українського державного університету залізничного транспорту.
ORCID iD: 0000-0002-9863-4487. E-mail: ihor.redko1972@gmail.com.
Бурда Юрій Олександрович, асистент кафедри теплогазопостачання, вентиляції і використання теплових вторинних енергоресурсів Харківського Національного університету будівництва та архітектури.
ORCID iD: 0000-0003-3470-1334. E-mail: burda.yurii@kstuca.kharkov.ua.
Півненко Юрій Олександрович, асистент кафедри теплогазопостачання, вентиляції і використання теплових вторинних енергоресурсів Харківського Національного університету будівництва та архітектури.
ORCID iD: 0000-0002-6675-2649. E-mail: yurii.pivnenko@kstuca.kharkov.ua.
Джиоєв Рафаель Леванович, аспірант кафедри теплогазопостачання, вентиляції і використання теплових вторинних енергоресурсів Харківського Національного університету будівництва та архітектури.
ORCID iD: 0000-0003-4046-7038. E-mail: office@khgorgas.com.ua.

Redko Ihor, Professor of the Department of Heat Engineering, Heat Engines and Energy Management of the Ukrainian state university of railway transport. ORCID iD: 0000-0002-9863-4487. Email: ihor.redko1972@gmail.com.
Burda Yurii, Assistant of the Department of Heat and Gas Supply, Ventilation and Use of Thermal Secondary Energy Resources, Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture. ORCID iD: 0000-0003-3470-1334. E-mail: burda.yurii@kstuca.kharkov.ua.
Pivnenko Yurii, Assistant of the Department of Heat and Gas Supply, Ventilation and Use of Thermal Secondary Energy Resources, Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture.
ORCID iD: 0000-0002-6675-2649. E-mail: yurii.pivnenko@kstuca.kharkov.ua.
Dzhyoiev Rafael Levanovich, postgraduate student, department of Heat and Gas Supply, Ventilation and Use of Thermal Secondary Energy Resources, Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture.
ORCID iD: 0000-0003-4046-7038. E-mail: office@khgorgas.com.ua.

Статтю прийнято 16.05.2022 р.

УДК 656.025.4

ВПЛИВ ПОДОВЖЕННЯ «ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ» ЛОКОМОТИВІВ НА ВВП КРАЇНИ ТА ЕКОНОМІКУ ЗАЛІЗНИЧНОЇ ГАЛУЗІ

**Д-р техн. наук С. В. Панченко, канд. екон. наук Є. І. Балака,
кандидати техн. наук В. В. Панченко, М. Є. Резуненко**

IMPACT OF EXTENDING THE «LIFE CYCLE» OF LOCOMOTIVES ON THE COUNTRY'S GDP AND THE ECONOMY OF THE RAILWAY INDUSTRY

**Dr. Sc. (Tech.) S. Panchenko, Cand. of Economical Sc. Ye. Balaka,
Cand. of Technical Sc. V. Panchenko, M. Rezunenko**

DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.200.2022.262696

Анотація. *У статті розглянуто економічний аспект причинно-наслідкового зв'язку між подовженням «життєвого циклу» локомотивів і зростанням валового внутрішнього продукту (ВВП) країни. Наведено результати досліджень впливу збільшення обсягів вантажних перевезень за рахунок модернізації діючого локомотивного парку на національну макроекономіку. Обґрунтовано економічну доцільність цих інноваційних заходів для підвищення ефективності роботи залізничної галузі в умовах сьогодення.*

Ключові слова: *«життєвий цикл» локомотивів, обсяг вантажних перевезень, ВВП України, ефективність модернізації локомотивів.*

Abstract. *The article describes the economic aspect of the causal relationship between the extension of the «life cycle» of locomotives and the growth of the country's gross domestic product (GDP). It was determined that the main factor inhibiting the development of the railway is the lack of funds, which significantly affects the pace of renewal of the locomotive fleet, which can, in turn, cause the unstable operation of the railway infrastructure. The article examines and substantiates the expediency of using correlation-regression analysis methods to build an economic-mathematical model that adequately determines the impact of the increased volume of freight transportation on the value of the GDP of purchasing power parity (PPP) due to the extension of the «life cycle» of freight locomotives (macroeconomic aspect). We determined the dependence of the value of Ukrainian GDP of the PKS on the volume of freight transportation by domestic wheeled transport. It was established that in the situation under research more than 45 % of the total variability of the value of Ukrainian GDP of the PKS is explained by the change in the total volume of cargo transportation by rail and road transport. The economic interpretation of the model parameters allows us to state that an increase in the volume of freight transportation by 1 unit of cargo leads to an increase in the value of the GDP of the PKS of Ukraine by an average of $ 0.0674. The use of the model suggested in the research made it possible to evaluate a prospective growth of the GDP of the PKS of Ukraine due to the increase in the volume of freight transportation by fifty locomotives. The extension of their service life by five years resulted in the amount of 8,893.7 thousand in US dollars, i.e. $ 1778.3 thousand annually. The study of the economic attractiveness of the development and implementation of the domestic system for monitoring the technical condition of locomotives (industry-economic aspect) for the railway industry led to drawing a reasonable conclusion about the possibility of obtaining a*

significant increase in the efficiency of the railway. It was established that the development and implementation of domestic systems on fifty locomotives compared to the purchase of foreign-made analogues provides savings of more than 32.6 thousand US dollars.

Key words: *«life cycle» of locomotives, volume of freight transportation, GDP of Ukraine, efficiency of locomotive modernization.*

Вступ. Однією з найважливіших проблем, що стоїть перед інфраструктурною складовою економіки України в наш час, є чітке та злагоджене функціонування транспортної системи. Насамперед це стосується залізничного транспорту, який здійснює понад 51 % загальнодержавного вантажообігу та залишається природним монополістом у перевезенні масових вантажів, більшість з яких має експортно-імпортне призначення і стратегічний характер: руда, метал, вугілля, паливно-мастильні матеріали, зерно, військові та контейнерні вантажі тощо.

Основна причина, що стримує сталий розвиток залізничної галузі, обумовлена дефіцитом фінансових ресурсів, який суттєво звужує можливості її технічного розвитку, і перш за все – оновлення рухомого складу. Найсуттєвішою проблемою в сучасних економіко-політичних умовах є забезпечення безперебійного функціонування локомотивного парку, про що переконливо свідчать офіціальні дані АТ «Укрзалізниця» [1]. На сьогодні загальний парк локомотивів складає близько 3550 од., проте постійно експлуатується тільки 1680 од., тобто 47,3 %. При цьому за останні сім років експлуатаційний парк локомотивів скоротився на 415 од., що складає 19,8 %. Враховуючи, що фізичний знос локомотивів перевищує 90 %, можна стверджувати, що навіть оновлення локомотивного парку на 150–200 од. за рахунок імпорту не гарантує стабільної роботи залізниці.

У сучасних умовах ключовим завданням є впровадження комплексу технічних заходів з модернізації локомотивів, що дозволить подовжити їхній «життєвий цикл» і зменшить ризики нестабільної роботи залізничного транспорту. Пріоритетним напрямом таких інноваційних рішень є облаштування локомотивів автоматизованою системою контролю їхнього технічного стану та оперативної діагностики причин виникнення позаштатних ситуацій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питанням підвищення ефективності роботи залізничного транспорту України в умовах обмежених фінансових ресурсів галузі присвячено чисельні дослідження.

Так, у роботах [2, 3] запропоновано методи оптимізації складу вантажних поїздів в аспекті економічних інтересів як залізниці, так і вантажовласника. У роботі [4] обґрунтовується доцільність і можливість диверсифікації діяльності національної залізниці; [5] – запропоновано шляхи підвищення ступеня обґрунтованості управлінських рішень щодо використання рухомого складу. Питання підвищення ефективності роботи локомотивів розглянуто в роботі [6]. У роботі [7] розглянуто можливість використання вантажних вагонів різної форми власності та розроблено організаційно-технологічну модель управління парком вантажних вагонів з урахуванням пріоритетного обслуговування вантажовідправників і вантажоодержувачів. Питанням організації транспортно-логістичних кластерів на базі залізниці присвячена робота [8]. Проте питання ефективності подовження «життєвого циклу» локомотивів шляхом їхньої модернізації та впливу цих заходів на економіку країни та економічний стан залізничної галузі потребує більш глибокого дослідження.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою статті є оприлюднення досліджень економічного характеру щодо причинно-наслідкового

взаємозв'язку між складовими ланцюга модернізація локомотивів → подовження їхнього «життєвого циклу» → збільшення обсягів вантажних перевезень → зростання ВВП країни. Результатом досліджень є обґрунтування доцільності розроблення та впровадження на магістральних локомотивах вантажного парку автоматизованої системи оперативного контролю їхнього технічного стану як з позиції макроекономічної вигоди, так і в аспекті можливого зростання ефективності роботи залізничної галузі.

Основна частина дослідження. *Вплив збільшення «життєвого циклу» локомотивів на економіку країни (макроекономічний аспект).* Поглиблення суспільного розподілу праці внаслідок стрімкого розвитку науково-технічного прогресу зумовило тісний взаємозв'язок між виробничою та невиробничою сферами економіки і відповідно між галузями в межах цих сфер. Цей взаємозв'язок проявляється у взаємодії та взаємозалежності функціонування галузей і їхніх структурних утворень – суб'єктів господарювання. Будь-яка зміна в окремій галузі сфери матеріального виробництва неодмінно впливає на стан інших галузей в обох сферах економіки, тобто змінює загальний економічний стан країни.

У світовій практиці прийнято, що найважливішим узагальнюючим показником економічного розвитку країн є валовий внутрішній продукт (ВВП), що характеризує загальну ринкову вартість усіх товарів і послуг кінцевого споживання (його було розроблено в 30-х рр. XX ст. в США лауреатом Нобелівської премії з економіки, випускником Харківського комерційного інституту Семеном Кузнецем і прийнято в Україні в 1990-х рр.).

Спираючись на вищесказане, можна стверджувати, що зміни в роботі транспортної галузі неодмінно впливають і на загальний стан економіки України, який проявляється в зміні показника ВВП. Логіка такого твердження полягає в тому, що показник ВВП, який відображує обсяг кінцевого споживання національного продукту і у свою чергу є результатом діяльності виробничої сфери, а транспортне обслуговування є невід'ємним елементом як системи споживання, так і системи виробництва. Збільшення «життєвого циклу» локомотивів дасть можливість забезпечити більший обсяг вантажних перевезень залізницею, що призведе до ланцюгової реакції в інших галузях сфери матеріального виробництва та позитивно позначиться на величині ВВП.

Дослідження цього процесу проведено на основі побудови кореляційно-регресійної моделі та прогнозування подальшого зростання ВВП. Доцільність застосування методу економіко-математичного моделювання підтверджується адекватністю отриманих результатів при моделюванні та подальшому прогнозуванні обсягів пасажирських перевезень залізничним і автомобільним транспортом [9-11].

Особливість методичного підходу до прогнозування можливого зростання ВВП країни під впливом збільшення обсягів залізничних вантажних перевезень полягає в тому, що сама модель враховує загальний вплив на величину ВВП сукупного обсягу вантажних перевезень як залізницею так і автомобілями. У розрахунках прийнятий показник ВВП, визначений у доларах США з урахуванням паритету купівельної спроможності (ВВП ПКС), тобто він відображує співвідношення гривні та долара на основі цін на аналогічні товари в України та США. У подальшому визначалась можлива зміна ВВП ПКС тільки під впливом фактора збільшенні обсягів перевезення вантажів саме залізницею при збереженні різних інших умов (незмінність обсягів автомобільних перевезень). Інформаційною базою для кореляційно-регресійного моделювання впливу обсягів вантажних перевезень на величину ВВП ПКС України є статистичні дані щодо динаміки цих показників у період 2011–2020 рр. [12], наведені в табл. 1 (з урахуванням роботи залізниці в 2011–2014 рр. на всій території України).

Таблиця 1

Показники ВВП ПКС і перевезення вантажів залізницею України

Показник	Рік									
	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
ВВП ПКС України, млрд дол.	378,5	386,4	392,6	373,4	340,5	353,3	368,8	390,74	380,5	365,8
Перевезення вантажів залізничним та автомобільним транспортом України, млн т	1722	1717	1722	1517	1371	1429	1361	1528	1460	1261

Прогнозна оцінка зростання ВВП ПКС під впливом збільшення обсягів перевезень вантажів завдяки подовженню «життєвого циклу» локомотивів здійснювалась у такій послідовності:

а) з використанням кореляційно-регресійного аналізу визначено тісноту і спрямованість взаємозв'язку між сукупним обсягом вантажних перевезень обома видами наземного транспорту (залізничним та автомобільним) і величиною ВВП ПСВ;

б) отримано регресійну економіко-математичну модель, що описує залежність величини ВВП ПКС від обсягів вантажного обслуговування вказаними видами транспорту;

в) на основі регресійної моделі визначено прогнозну оцінку зростання ВВП ПКС під впливом збільшення обсягів вантажу, що перевозитиметься залізницею при використанні модернізованих локомотивів з подовженим строком їхньої експлуатації.

У результаті кореляційно-регресійного аналізу отримано однофакторну економіко-математичну модель вигляду $y = a + bx$, яка визначає залежність величини ВВП ПКС від сукупних обсягів вантажних перевезень залізничним та автомобільним транспортом

$$y = 271,2702 + 0,06744x, \qquad (1)$$

де y – величина річного ВВП ПКС;

x – сукупний річний обсяг вантажних перевезень залізничним і автомобільним транспортом.

Кореляційно-регресійний аналіз показав, що збільшення обсягів перевезень (x) на 1 од. вантажу призводить до зростання ВВП ПКС (y) у середньому на 0,06744 од. в дол. США, тобто при зростанні обсягів перевезень (x) на 100 % їхній вплив на величину ВВП ПКС (y) складає 6,74 %. Зв'язок між показником обсягів вантажних перевезень (x) іпоказником величини ВВП ПКС (y), за критерієм Чеддока, є помітним і прямим $(0,5 < r_{xy} = 0,673 < 0,7)$.

Якість економіко-математичної моделі характеризується такими показниками:

- точність підбору рівняння моделі є середньою (коефіцієнт детермінації $R^2 = 0.6732^2$), тобто тільки 45,29 % випадків зміни обсягів вантажних перевезень (x) призводять до зміни обсягу ВВП ПКС (y). Інші 54,71 % змін ВВП ПКС (y) пояснюються сукупністю факторів, що не розглядаються в моделі, але мають відповідний вплив на економіку країни (ступінь впливу цих факторів може стати метою майбутніх досліджень);

- стандартна помилка (S), що показує можливе максимальне відхилення розрахункового (змодельованого) значення обсягу ВВП ПКС (y) від середнього

значення часового ряду за десять попередніх років, складає 12,99 млрд дол.;

- критерій Фішера (F), що характеризує якість моделі, складає 6,623. Табличне значення критерію Фішера ($F_{\text{табл}}$) складає 5,32.

Оскільки рахункове значення $F > F_{\text{табл}}$ (6,623 > 5,32), то це свідчить, що рівняння регресії є статистично значущим;

- ступінь значущості коефіцієнта регресії (b), за критерієм Стьюдента, свідчить, що сукупний обсяг вантажних перевезень залізничним і автомобільним транспортом не має суттєвого впливу на величину ВВП ПКС країни, оскільки $t_{\text{розр}} < t_{\text{крит}}$. Величина $t_{\text{крит}} = 2.752$ за таблицею критичних точок розподілу Стьюдента, проте розрахункова величина ступеня значущості коефіцієнта кореляції ($t_{\text{розр}}$) досягає лише величини 2,573;

- середня помилка апроксимації ($\bar{A}$), тобто середнє відхилення розрахункових значень кореляційно-регресійної моделі від фактичних даних десятьох спостережень складає 2,59 %. Це свідчить про можливість використання моделі для кореляційно-регресійного аналізу.

Основні показники якості економіко-математичної моделі (1) наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Основні показники якості економіко-математичної моделі

Показник	Значення
Коефіцієнт детермінації (R^2)	0,4529
Середня помилка апроксимації ($\bar{A}$)	2,59%
Стандартна помилка (S)	12,99
Критерій Фішера (F)	6,623

Отже, встановлено, що обсяг вантажних перевезень вітчизняним колісним транспортом (залізничним та автомобільним) хоч і не має вирішального впливу на формування ВВП ПКС України, проте вплив цього фактора має місце і його можна та доцільно враховувати. Особливого значення це набуває в умовах воєнного стану та блокування українських морських портів.

Спираючись на результати проведених досліджень, можна очікувати, що модернізація вантажних локомотивів (оснащення їх системою контролю технічного стану) дозволить продовжити тривалість їхнього «життєвого циклу» як мінімум на п’ять років. Практичні впровадження і випробування цієї системи дають підставу стверджувати про відносно невелику трудомісткість її встановлення на локомотиві. Відповідні розрахунки показали, що в короткий строк можна модернізувати п’ятдесят локомотивів вантажного парку. Це забезпечить збільшення обсягів вантажних перевезень, що у свою чергу створить умови для отримання додаткового ВВП в масштабі країни.

З метою проведення цього дослідження визначено середньорічний обсяг перевезення вантажів одним локомотивом експлуатаційного парку та можливий приріст обсягів вантажних перевезень п’ятдесятьма модернізованими локомотивами за строк збільшення їхнього «життєвого циклу» на п’ять років і на цій підставі оцінено величину ВВП, яку можна додатково отримати.

Середньорічний обсяг перевезення вантажів одним локомотивом експлуатаційного парку визначено на основі даних робіт [1, 12], що наведено в табл. 3 (без урахування відповідних показників роботи залізниці в тимчасово окупованій АР

Крим і непідконтрольних районах Донецької та Луганської областей).

Розрахунки показують, що середньорічний обсяг перевезення вантажів одним локомотивом експлуатаційного парку складає 527,5 тис. т $\left(\frac{2359000}{4472}\right)$. Оскільки передбачається обладнати системами контролю технічного стану п'ятдесят вантажних локомотивів, що забезпечить подовження їхнього «життєвого циклу» на п'ять років, то це дозволить збільшити обсяг перевезення вантажів за цей період на 131875 тис. т $(527{,}5 * 50 * 5)$.

Таблиця 3

Показники обсягів вантажних перевезень і робочого парку вантажних локомотивів

Показник	Рік						
	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Обсяг вантажів, млн т	386	350	343	339	322	313	306
Кількість вантажних локомотивів експлуатаційного парку, од.	641	619	596	589	659	680	688

На підставі отриманих даних і економіко-математичної моделі, що описує вплив обсягів вантажних перевезень на ВВП ПКС, визначено величину додаткового ВВП ПКС України, яку можливо отримати за рівних інших умов протягом п'яти років у результаті модернізації визначеної кількості локомотивів, у розмірі 8893,7 тис. дол. США $(0{,}06744 * 131875)$, тобто 1778,3 тис. дол. щорічно (35,6 тис. дол. у розрахунку на один локомотив за рік).

За експертною оцінкою, сукупні одноразові витрати на розроблення і впровадження систем контролю технічного стану на п'ятдесяти вантажних локомотивах складають 3500 тис. грн.

Слід зауважити, що експлуатація систем контролю технічного стану локомотивів не потребує поточних витрат на їх обслуговування. Виходячи з валютного курсу 28,6 грн за 1 дол. США, що передбачено Бюджетом України на 2022 р., загальна сума одноразових витрат складатиме 122,38 тис. дол. (3500000/28,6). Таким чином, величина приросту ВВП ПКС в розрахунку на 1 дол. одноразових витрат за п'ять років експлуатації п'ятдесяти модернізованих локомотивів складе 72,67 дол. (8893,65/ 122,38).

Підвищення ефективності функціонування залізничної галузі внаслідок збільшення «життєвого циклу» локомотивів (галузево-економічний аспект). Впровадження системи контролю технічного стану локомотивів дозволяє підвищити ефективність функціонування залізничної галузі в цілому за рахунок збільшення обсягів вантажних перевезень, зменшення позапланових поточних ремонтів локомотивів, економії валютних ресурсів на придбання закордонних аналогів системи контролю.

З метою оцінювання можливого підвищення ефективності залізничних вантажних перевезень визначено:

- величину приросту економічного ефекту від розроблення та серійного впровадження системи контролю технічного стану п'ятдесяти локомотивів вантажного парку протягом розрахункового періоду (п'ять років);
- строк повернення одноразових витрат на розроблення та впровадження цього інноваційного заходу;
- загальну рентабельність впровадження системи контролю технічного стану на п'ятдесяти вантажних локомотивах;

- ступінь валютної вигідності реалізації інноваційної пропозиції, за критерієм Бруно.

Величину приросту економічного ефекту визначено відповідно до загальноприйнятого у світовій практиці методу перевищення вартісної оцінки результатів (доходів) (P_T) від впровадження інноваційного заходу над вартісною оцінкою сукупних витрат на його реалізацію протягом розрахункового періоду ($З_T$) з урахуванням можливої зміни вартості грошей за цей період (α_t) [13-15], а саме

$$E_T = P_T - З_T = \sum_{t=1}^{n} E_t \cdot \alpha_t = \sum_{t=1}^{n} (P_T - З_T) \cdot \alpha_t \,, \qquad (2)$$

де P_T – вартісна оцінка результатів заходу в році t розрахункового періоду;

$З_t$ – вартісна оцінка сукупних витрат на реалізацію заходу в році t розрахункового періоду;

n – кількість років розрахункового періоду.

Тривалість розрахункового періоду в п’ять років визначено експертним шляхом виходячи з можливого продовження життєвого циклу локомотивів (фізичний знос яких на сьогодні перевищує 90 %), а також строку використання системи контролю їхнього технічного стану, що відповідає сучасним темпам морального старіння інформаційних технологій. Вихідні дані для оцінювання економічної ефективності розроблення та впровадження системи контролю технічного стану вантажних локомотивів наведено в табл. 4.

Таблиця 4

Вихідні дані для оцінювання економічної ефективності проєкту

Показник	Величина показника
1	2
1. Кількість локомотивів, обладнаних системою контролю технічного стану, од.	50
2. Обсяг перевезення вантажів одним локомотивом у середньому за рік, тис. т	527,5
3. Доходи АТ «Укрзалізниця» від перевезення вантажів у розрахунку на 1 т, грн [13] *	212,48
4. Одноразові витрати на реалізацію проєкту, у т. ч.: 4.1. на науково-дослідні та конструкторські роботи, тис. грн; 4.2. обладнання системою контролю одного локомотива, тис. грн	 500 60
5. Витрати АТ «Укрзалізниця» на перевезення 1 т вантажу, грн [13] *	176,17
6. Середня вартість одного поточного ремонту локомотива, тис. грн [14]	290
7. Середня кількість поточних ремонтів за рік одного локомотива протягом року, рем.	1,3
8. Можливе скорочення поточних ремонтів локомотивів, %	20
9. Ліквідаційне сальдо (залишкова вартість) системи контролю технічного стану локомотивів, тис. грн, – відсутнє	-
10. Річна дисконтна ставка українських банків за депозитними внесками, %	7
11. Річний рівень інфляційних очікувань, % **	5,5

Продовження табл. 4

1	2
12. Можливий ступінь ризику – низький, % збільшення інфляції ***	1
13. Кількість років розрахункового періоду, р.	5
14. Розрахунковий рік розрахункового періоду	перший
15. Вартість одиниці системи контролю технічного стану локомотивів закордонного виробництва в іноземній валюті (дол. США), тис. дол.	3,1

* Питомі величини доходів і витрат визначено за даними Консолідованої фінансової звітності АТ «Укрзалізниця» і обсягом вантажних перевезень за 2020 р.

** Річний рівень інфляційних очікувань протягом розрахункового періоду визначено на основі експертної оцінки виходячи з показників інфляції попередніх років і бюджету України 2022 р.

*** Можливий ступень ризику оцінює вірогідність дострокового виходу з ладу систем контролю технічного стану модернізованих локомотивів.

Коефіцієнти, що визначають зміну вартості грошей у часі протягом розрахункового періоду (α_t), тобто приведення грошових потоків різних років реалізації проєкту до розрахункового (першого) року, визначено за формулою

$$\alpha_t = \frac{1}{\left[(1+E)(1+I+R)\right]^t p^{-t}k}, \qquad (3)$$

де E – річна ставка комерційних банків за депозитними внесками, %;

I – щорічний рівень інфляції в період здійснення проєкту, %;

R – можливий ступінь ризику, %;

t_p – порядковий номер розрахункового року;

$t_к$ – порядковий номер того року, грошові потоки якого приводяться до розрахункового року.

Для кожного з п’яти років реалізації проєкту (розрахункового періоду) коефіцієнти дисконтування (α_t), тобто приведення грошових потоків майбутніх років до теперішньої вартості грошей (першого року здійснення проєкту), складають

$$\alpha_1 = 1,\ \alpha_2 = 0{,}88,\ \alpha_3 = 0{,}77,$$

$$\alpha_4 = 0{,}68,\ \alpha_5 = 0{,}59.$$

Дані випробувань дозволяють дійти висновку, що впровадження системи технічного стану локомотивів дозволяє скоротити кількість поточних ремонтів на 20 %. Виходячи з цього кількість поточних ремонтів п’ятдесяти локомотивів, обладнаних відповідною системою, зменшиться щорічно на 13 од. (1,3*50*0,2) (табл. 4).

Розрахунок приросту економічного ефекту АТ «Укрзалізниця» від розроблення та впровадження системи технічного стану вантажних локомотивів наведено в табл. 5.

Приріст економічного ефекту з урахуванням зміни вартості грошей у часі (приведення до першого року розрахункового періоду), який отримує АТ «Укрзалізниця» у разі впровадження системи контролю технічного стану п’ятдесяти вантажних локомотивів протягом п’яти років, складе 3765,50 млн грн.

Таблиця 5

Розрахунок економічного ефекту від розроблення та впровадження системи контролю технічного стану вантажних локомотивів

Показник	Рік розрахункового періоду				
	1	2	3	4	5
1	2	3	4	5	6
Результати					
1. Кількість локомотивів, обладнаних системою контролю технічного стану, од.	50	50	50	50	50
2. Обсяг перевезення вантажів одним локомотивом у середньому за рік, тис. т	527,5	527,5	527,5	527,5	527,5
3. Обсяг перевезення вантажів п'ятдесятьма локомотивами за рік, тис. т	26375	26375	26375	26375	26375
4. Доходи АТ «Укрзалізниця» від перевезення вантажів у розрахунку на 1 т, грн	212,48	212,48	212,48	212,48	212,48
5. Доходи АТ «Укрзалізниця» від перевезення вантажів п'ятдесятьма локомотивами за рік, млн грн	5604,16	5604,16	5604,16	5604,16	5604,16
Витрати					
6. Витрати на обладнання системою контролю одного локомотива, тис. грн	60	–	–	–	–
7. Одноразові витрати на реалізацію проєкту, тис. грн, у т. ч.:	3500	–	–	–	–
7.1. на науково-дослідні та конструкторські роботи, тис. грн;	500	–	–	–	–
7.2. обладнання системою контролю п'ятдесяти локомотивів, тис. грн	3000	–	–	–	–
8. Витрати АТ «Укрзалізниця» на перевезення 1 т вантажу, тис. грн	176,17	176,17	176,17	176,17	176,17
9. Витрати АТ «Укрзалізниця» на перевезення вантажів п'ятдесятьма локомотивами за рік, млн грн	4646,48	4646,48	4646,48	4646,48	4446,48
10. Середня вартість одного поточного ремонту локомотива, тис. грн	290	290	290	290	290
11. Скорочення поточних ремонтів п'ятдесятьма локомотивами в середньому за рік, од.	13	13	13	13	13
12. Зменшення витрат АТ «Укрзалізниця» на поточний ремонт п'ятдесяти локомотивів, млн грн	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8
13. Разом витрати АТ «Укрзалізниця» (п. 7 + п. 9 - п. 12), млн грн	4646,18	4642,68	4642,68	4642,68	4642,68
14. Приріст економічного ефекту (п. 5 - п. 13), млн грн	957,98	961,48	961,48	961,48	961,48
15. Коефіцієнт приведення до розрахункового року	1	0,88	0,77	0,68	0,59
16. Приріст економічного ефекту з урахування коефіцієнта приведення до розрахункового року, млн грн	957,98	846,10	740,36	653,81	567,27
17. Приріст економічного ефекту зростаючим підсумком, млн грн	957,98	1804,08	2544,42	3198,23	3765,50

Строк повернення одноразових витрат на розроблення та впровадження визначеної системи (строк окупності одноразових витрат) визначається роком, коли величина сукупних результатів (доходів) за відрахуванням поточних витрат зрівняється або перевищить величину одноразових витрат з урахуванням зміни вартості грошей у часі, тобто виконується умова

$$\sum_{t=1}^{n} K_t \cdot \alpha_t \le \sum_{t=1}^{n} (P_t - З_{t,пот}) \cdot \alpha_t , \quad (4)$$

де K_t – одноразові витрати на реалізацію проєкту, грн;

$З_{t,пот}$ – поточні витрати на реалізацію проєкту, грн.

З розрахунків видно (табл. 5, ряд. 17), що одноразові витрати на розроблення та впровадження визначеної системи в розмірі 3,5 млн грн повернуться в першому році реалізації проєкту.

Визначено величину загальної рентабельності впровадження системи контролю технічного стану п'ятдесяти вантажних локомотивів ($P_{рент.заг.}$) за формулою

$$P_{рент.заг.} = \sum_{t=1}^{n} P_t \cdot \alpha_t \Big/ \sum_{t=1}^{n} З_t \cdot \alpha_t . \quad (5)$$

Отже,

$$P_{рент.заг.} = \frac{5604,16 \cdot (1 + 0,88 + 0,77 + 0,68 + 0,59)}{4646,18 + 4642,68 \cdot (0,88 + 0,77 + 0,68 + 0,59)} = 1,21 .$$

Розрахунок загальної рентабельності проєкту показує, що за розрахунковий період на 1 грн витрат в середньому припадає 1,21 грн доходу.

Визначено рівень валютної вигідності впровадження системи технічного стану локомотивів вітчизняного розроблення порівняно з іноземним аналогом, за критерієм Бруно ($K_{бр}$), за формулою

$$K_{бр} = (\sum_{t=1}^{n} N \cdot Ц_В \cdot q_t \Big/ \sum_{t=1}^{n} З_{t,одр}) \cdot \alpha_t , \quad (6)$$

де N – кількість систем контролю технічного стану локомотивів закордонного виробництва в році t розрахункового періоду, од.;

$Ц_в$ – вартість одиниці системи контролю технічного стану локомотивів закордонного виробництва в іноземній валюті в році t розрахункового періоду, дол. США;

q_t – співвідношення величин національної та іноземної валют (перевідний коефіцієнт) у році t розрахункового періоду;

$З_{t,одр}$ – одноразові витрати систем контролю технічного стану локомотивів вітчизняного виробництва в році t розрахункового періоду, грн.

Вважається, що закупівля та впровадження систем контролю технічного стану локомотивів здійснюватиметься в першому році розрахункового періоду $\alpha_1 = 1$.

Виходячи з цього рівень валютної вигідності впровадження системи контролю технічного стану локомотивів вітчизняного розроблення, за критерієм Бруно, складає

$$K_{бр} = \frac{3,1 \cdot 50 \cdot 28,6}{3500} \cdot 1 = 1,27 .$$

Це дасть можливість отримати економію валюти в розмірі понад 32,6 тис. дол. США при курсі 28,6 грн за 1 дол. США (3,1·50-3500/28,6).

Оскільки показники загальної рентабельності проєкту (1,21) і його валютної вигідності, за критерієм Бруно (1,27), більше одиниці, то це свідчить про економічну доцільність впровадження системи контролю технічного стану локомотивів.

Висновки:

1. Досліджено та обґрунтовано доцільність використання методів кореляційно-регресійного аналізу для побудови економіко-математичної моделі, що адекватно визначає вплив збільшення обсягів вантажних перевезень на величину ВВП ПКС за рахунок подовження «життєвого циклу» вантажних локомотивів (макроекономічний аспект). Визначено залежність величини ВВП ПКС України від обсягів вантажних перевезень вітчизняним колісним транспортом. Було обрано парну лінійну регресію та оцінено її параметри методом найменших квадратів. Статистична значущість рівняння перевірена за допомогою коефіцієнта детермінації та критерію Фішера. Встановлено, що в досліджуваній ситуації понад 45 % загальної варіабельності величини ВВП ПКС України пояснюється зміною загальних обсягів вантажних перевезень залізничним і автомобільним транспортом. Економічна інтерпретація параметрів моделі дозволяє визначити, що збільшення обсягів вантажних перевезень на 1 од. вантажу призводить до збільшення величини ВВП ПКС України в середньому на 0,0674 од. в доларах США. Використання моделі (1) дало можливість отримати прогнозну оцінку зростання ВВП ПКС України за рахунок збільшення обсягів вантажних перевезень п’ятдесятьма локомотивами за умови подовження їхнього строку експлуатації на п’ять років в обсязі 8893,7 тис. дол. США, тобто 1778,3 тис. дол. щорічно.

2. Дослідження економічної привабливості для залізничної галузі розроблення та впровадження вітчизняної системи контролю технічного стану локомотивів (галузево-економічний аспект) дозволило зробити обґрунтований висновок щодо можливості отримання значного підвищення ефективності роботи залізниці. Це підтверджується такими прогнозними показниками: сукупний економічний ефект у результаті збільшення обсягів вантажних перевезень п’ятдесятьма локомотивами, обладнаних вітчизняними системами контролю їхнього технічного стану, за п’ять років очікується в розмірі 3765,50 млн грн у нинішній вартості грошей; загальна рентабельність цього інноваційного заходу складає 1,21 (доходи в 1,21 раза перевищує суму витрат); розроблення та впровадження вітчизняних систем на п’ятдесяти локомотивах порівняно з закупками аналогів іноземного виробництва дасть економію понад 32,6 тис. дол. США ($K_{бр} = 1,27$).

Список використаних джерел

1. Довідник основних показників роботи регіональних філій АТ «Українська залізниця» (2004-2019 роки). Київ, 2020. 39 с.

2. Ломотько Д. В., Балака Є. І., Резуненко М. Є. Визначення оптимальної кількості вагонів у маршрутних поїздах. *Залізничний транспорт України*: наук.-практ. журн. Київ, 2019. № 4. С. 4-12.

3. Ломотько Д. В., Балака Є. І., Резуненко М. Є. Логістичні підходи щодо оптимізації складу маршрутних поїздів в системі «вантажовласник – залізниця». *Залізничний транспорт України*. 2020. № 4. С. 3-11.

4. Концептуальні підходи до диверсифікації діяльності ПАТ «УКРЗАЛІЗНИЦЯ» / С. В. Панченко, Г. В. Ватуля, Є. І. Балака, Д. С. Лючков. *Українська залізниця*. 2018. № 9 (63). С. 15-19.

5. Lomotko D. V., Kovalov A. O., Koval'ova O. V. Formation of the fuzzy support system for decision-making on merchantability of rolling stock in its allocation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2015. T. 6. No. 3 (78). P. 11-17. URL: http://dx.doi.org/10.15587/1729-4061.2015.54496].

6. Butko T., Prokhorchenko A., Muzykin M. Improvement of methods for determining locomotive circulation patterns with regard to the technological features of car-stream flows. *East-European Journal of Advanced Technologies*. 2016. Vol. 5. No. 3. P. 47-55.

7. Данько Н. И., Ломотько Д. В., Кулешов В. В. Разработка организационно-технологической модели управления парком грузовых вагонов разной собственности. *Инновационный транспорт*. 2012. № 4 (5). С. 8-13.

8. Альошинський Є. С., Балака Є. І., Резуненко М. Є. Діалектика логістики і задачі сьогодення: кластеризація та підготовка фахівців. *Залізничний транспорт України.* Київ, 2016. № 3-4. С. 8-13.

9. Прогнозування обсягів пасажирських перевезень в дальньому залізничному сполученні на основі багатофакторного аналізу / Є. Балака, М. Резуненко, С. Резуненко, М. Попов. *Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп*. Харків: УкрДУЗТ, 2019. Вип. 185. С. 6-14.

10. Balaka Ye., Rezunenko M., Vdovychenko V. Comparative forecast of passenger transportation in long haul railway and long-distance bus service. *Automobile Transport*. No. 48. P. 54-63.

11. Тенденції розвитку залізничних перевезень в провідних країнах світу / Є. І. Балака, О. І. Зоріна, Н. М. Колеснікова та ін. *Залізничний транспорт України.* 2000. № 1. С. 22-23.

12. Україна в цифрах 2014-2019 рр. Державна служба статистики України. URL: http://www.ukrstat.gov.ua.

13. Оцінка економічної доцільності інвестицій в інноваційні проекти на транспорті: навч. посіб. / Є. І. Балака, О. І. Зоріна, Н. М. Колесникова, І. М. Писаревський; за заг. ред. Є. І. Балаки. Харків: УкрДАЗТ, 2005. 210 с.

14. Бромвич М. Анализ экономической эффективности капитальных вложений: пер. с англ. Москва: ИНФРА-М, 1996. 432 с.

15. Верба В. А., Загородніх О. А. Проектний аналіз: підручник. Київ: КНЕУ, 2000. 322 с.

Панченко Сергій Володимирович, доктор технічних наук, професор кафедри автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів Українського державного університету залізничного транспорту, м. Харків, Україна, ORCID iD: 0000-0002-7626-9933. Тел.: +380994886100. E-mail: panchenko074@ukr.net.
Балака Євгеній Іванович, кандидат економічних наук, доцент кафедри транспортних систем та логістики Українського державного університету залізничного транспорту, м. Харків, Україна. ORCID iD: 0000-0002-0508-937X. Тел.: +308974541488. E-mail: ev.balaka@gmail.com.
Панченко Владислав Вадимович, кандидат технічних наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Українського державного університету залізничного транспорту, м. Харків, Україна. ORCID iD: 0000-0003-4822-7151. Тел.: +380661878961. E-mail: vlad_panchenko@ukr.net.
Резуненко Марина Євгенівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри вищої математики та фізики Українського державного університету залізничного транспорту, м. Харків, Україна. ORCID iD: 0000-0003-2073-5242. Тел.: +380974401096. E-mail: Rezunenko@kart.edu.

Panchenko Serhii, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Automation and Computer Telecontrol of Trains, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine, ORCID iD: 0000-0002-7626-9933. Tel.: +380994886100. E-mail: panchenko074@ukr.net.
Balaka Yevhenii, Candidate of Economical Sciences, Associate Professor, Department of Transport Systems and Logistics, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. ORCID iD: 0000-0002-0508-937X. Tel.: +308974541488. E-mail: ev.balaka@gmail.com.

Panchenko Vladyslav, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. ORCID iD: 0000-0003-4822-7151. Tel .: +380661878961. E-mail: vlad_panchenko@ukr.net.
Rezunenko Maryna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Higher Mathematics and Physics, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. ORCID iD: 0000-0003-2073-5242. Tel.: +380974401096. E-mail: Rezunenko@kart.edu.

Статтю прийнято 14.06.2022 р.

ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ УКРАЇНСЬКОГО ДЕРЖАВНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

COLLECTION OF SCIENTIFIC WORKS OF THE UKRAINIAN STATE UNIVERSITY OF RAILWAY TRANSPORT

Випуск 200

«Збірник наукових праць УкрДУЗТ» включено до списку друкованих (електронних) періодичних видань, що включаються до Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук (Наказ МОН України від 15.10.2019 р. № 1301).

Статті друкуються в авторській редакції мовою оригіналу.
Всі статті пройшли подвійне сліпе наукове рецензування.

Відповідальний за випуск Новікова М. А.

Редактор Ібрагімова Н. В.

КВ № 21515 - 11415ПР від 27.07.2015 р. Підписано до друку 17.06.2022 р.
Формат паперу А4. Папір писальний.
Умовн. друк. арк. 3,5. Тираж 50. Замовлення № .

Видавець Український державний університет залізничного транспорту,
61050, Харків-50, майдан Фейєрбаха,7.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 6100 від 21.03.2018р.