



RS Global
Journals

Scholarly Publisher
RS Global Sp. z O.O.
ISNI: 0000 0004 8495 2390

Dolna 17, Warsaw, Poland 00-773
Tel: +48 226 0 227 03
Email: editorial_office@rsglobal.pl

JOURNAL	World Science
p-ISSN	2413-1032
e-ISSN	2414-6404
PUBLISHER	RS Global Sp. z O.O., Poland
ARTICLE TITLE	НАДІЙНІСТЬ ПАР ТЕРТЯ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ НА СТАДІЇ ПРИПРАЦЮВАННЯ
AUTHOR(S)	Дмитриченко М. Ф., Богданов І. М.
ARTICLE INFO	Dmytrychenko M. F., Bogdanov I. M. (2022) Reliability of Vehicle Vehicles at the Stage of Preparation. World Science. 2(74). doi: 10.31435/rsglobal_ws/28022022/7773
DOI	https://doi.org/10.31435/rsglobal_ws/28022022/7773
RECEIVED	10 January 2022
ACCEPTED	18 February 2022
PUBLISHED	23 February 2022
LICENSE	 This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License .

© The author(s) 2022. This publication is an open access article.

НАДІЙНІСТЬ ПАР ТЕРТЯ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ НА СТАДІЇ ПРИПРАЦЮВАННЯ

Дмитриченко М. Ф., доктор технічних наук, Національний транспортний університет, Київ, Україна, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4223-1838>

Богданов І. М., Національний транспортний університет, Київ, Україна, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6346-4388>

DOI: https://doi.org/10.31435/rsglobal_ws/28022022/7773

ARTICLE INFO

Received: 10 January 2022

Accepted: 18 February 2022

Published: 23 February 2022

KEYWORDS

earing, friction pairs, surface hardening, heat treatment, speed-power factor.

ABSTRACT

The reduction of the duration of running-in is most strongly influenced by the speed-power and technological factors. It was experimentally established that at specific loads of 0.15 – 3 MPa and tribopair velocities of 6 – 40 m/min (0.1 - 0.66 m/sec) and methods of surface hardening and surface hardening, nitrocementation and ion-plasma thermocyclic nitriding, a combination of speed, power and technological factors can reduce the running-in process by 1.5 - 2 times.

A mathematical model has been developed that combines the components of these factors for the running-in process in relation to the reduction of the latter.

The stand for experimental research of the tribotechnical system, which consists of an automatic gearbox with a magnetic brake, a power supply, a control panel and a PC, has been upgraded. The firmware is written in the Python programming language.

For further research in the chosen direction, the application of wear-resistant coatings with a thickness of 3 ... 10 μm by PVD methods containing nitrides and carbides is promising.

Citation: Dmytrychenko M. F., Bogdanov I. M. (2022) Reliability of Vehicle Vehicles at the Stage of Preparation. *World Science*. 2(74). doi: [10.31435/rsglobal_ws/28022022/7773](https://doi.org/10.31435/rsglobal_ws/28022022/7773)

Copyright: © 2022 **Dmytrychenko M. F., Bogdanov I. M.** This is an open-access article distributed under the terms of the **Creative Commons Attribution License (CC BY)**. The use, distribution or reproduction in other forums is permitted, provided the original author(s) or licensor are credited and that the original publication in this journal is cited, in accordance with accepted academic practice. No use, distribution or reproduction is permitted which does not comply with these terms.

Вступ. Найбільш масовими деталями у машинобудуванні є зубчасті колеса. Тенденція росту потужності, навантажень і швидкостей у транспортному машинобудуванні вимагає розробки зубчастих передач для високошвидкісних прецизійних машинних агрегатів. Надійність трансмісій засобів транспорту, особливо швидкісних легкових автомобілів, автосамоскидів великої вантажопідйомності, вантажних автомобілів, а також енергонасичених тракторів вимагає розробки високонавантажених зубчастих передач. Тенденції зниження ваги у транспортному машинобудуванні ставлять питання щодо застосування міцних зубчастих коліс.

Важливою складовою будь-якої нової чи відремонтованої транспортної машини, її агрегатів і механізмів є період обкатки, у процесі якої відбувається припрацювання. Скорочення цього періоду є особливо важливим для тривалої подальшої експлуатації машини. При цьому вирішальними факторами є дія на зношування пар тертя як зовнішніх факторів (сил, швидкості, температури), так і матеріалів пари та технологій їх зміцнення. Важливим також є і вибір оливи для періоду припрацювання.

Аналіз публікацій. Новий або відремонтований механізм машини обов'язково має пройти обкатку, призначення якої – припрацювання усіх пар тертя, з яких складається машина [1].

У процесі припрацювання мають бути реалізовані два процеси – макрогеометричний та мікрогеометричний. При першому з них відбувається інтенсивне припрацювання на макрорівні, тобто коли у результаті пластичного деформування та зношування збільшується фактичний майданчик контактування. Після досягнення достатньої величини цього майданчику зростають площі одиничних фактичних контактів і збільшення їх числа на мікрорівні [1, 2, 3].

У двигунів внутрішнього згорання автомобілів макрогеометричний процес триває 1÷2 години, а повне припрацювання, що включає обидва ці процеси – 35÷40 годин [1].

Припрацювання відбувається на окремих ділянках у режимах тертя при граничному або напіврідинному мащенні. При цьому накопичуються продукти зношування. Результатом триботехнічних дисипаційних процесів є утворення у процесі припрацювання на поверхнях тертя пасивуючих плівок. Ці плівки захищають основний метал від адгезійного зношування, а також зовнішньої хімічної дії [4]. Саме тому промивання системи після зливання відпрацьованої оливи слід виконувати малов'язкою оливою, зокрема дизельним паливом, а не, наприклад, гасом, який зруйнував би цю плівку.

Критеріями закінчення процесу припрацювання прийнято вважати [1]:

- початок прямолінійної ділянки відомої класичної кривої зношування;
- мінімізацію потужності при холостому ході машини;
- стабілізацію моменту тертя та температури;
- найбільшу ефективну потужність двигуна при заданій швидкості;
- досягнення заданого ступеня прилягання поверхонь, що контактують.

Виходячи із цього, сформульована **мета дослідження**, яка полягає у підвищенні ефективності машин зокрема нових та відремонтованих засобів транспорту, шляхом сумісної дії швидкісно-силового фактору та сучасних методів зміцнення поверхонь пар тертя шляхом скорочення періоду припрацювання.

Програма та методика досліджень. На рисунку 1 зображена змінена нами класична крива залежності зносу h від тривалості часу t . Зношування відбувається у три стадії [5]. На стадії I відбувається припрацювання контактуючих поверхонь деталей. Ця стадія характеризується нестабільністю параметрів тертя, високою швидкістю зношування, що обумовлено значними пластичними деформаціями нерівностей поверхневих шарів деталей, перебудовою технологічного мікрорельєфу поверхонь на експлуатаційний та зміною фізико-механічних властивостей оливи і матеріалів трибосистеми.

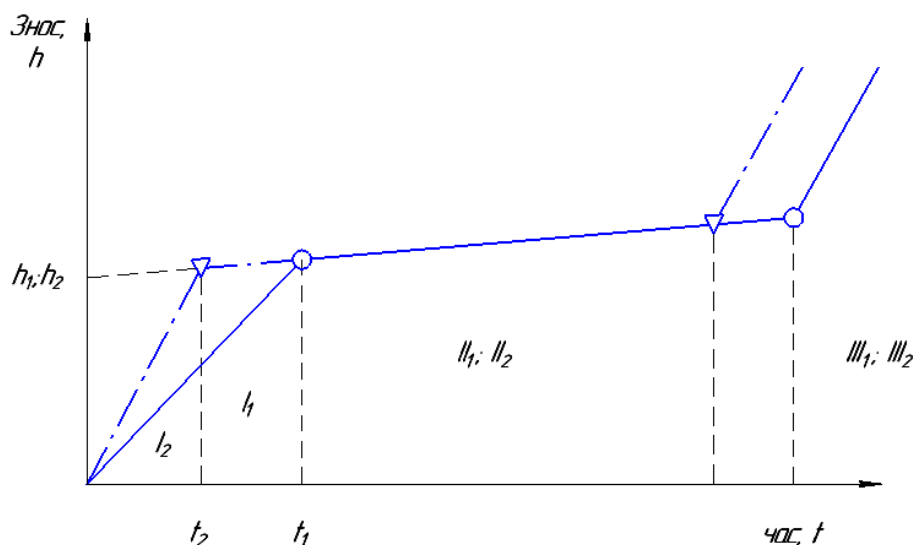


Рис. 1. Залежність зносу h від тривалості часу t . (I₁, I₂ – стадія припрацювання; II₁, II₂ – період нормального (експлуатаційного) зношування пар тертя; III₁, III₂ – період катастрофічного зношування.)

Ділянка II кривої відповідає періоду нормальної роботи з'єднання після припрацювання. Спостерігається стабілізація параметрів тертя, а швидкість зношування відносно невелика, однакова і стала.

Знос деталей поступово спричиняє погіршення умов тертя при роботі з'єднань, у результаті чого швидкість зношування різко зростає. Цей період процесу відповідає кривій III.

Припрацювання має свої особливості стосовно оливи, що при цьому застосовується. Така олива повинна бути малов'язкою порівняно з оливою, що використовується у експлуатаційний період. Це дає можливість оливі проникати у вузькі щілини, добре охолоджувати пару тертя, а також ефективно видаляти з робочих поверхонь продукти зношування.

Відповідно до сказаного, для припрацювання обираємо оливу з малою в'язкістю, клас 9, кінематична в'язкість при температурі 100°C – $6\div 11 \text{ мм}^2/\text{с}$. Ці показники відповідають оливам 75W і 80W SAE (США) при аналогічній температурі.

Наукові дослідження у межах даної роботи були зосереджені на вивченні явищ, що відбуваються при роботі зубчастих пар, які широко застосовуються у засобах транспорту (взули тертя трансмісії і двигуна, а також шестеренних машин). Розглядалися зубчасті колеса евольвентного профілю – звичайні та кориговані. Допущенням було також те, що обидва колеса пари виготовлялись з одного і того ж матеріалу.

Матеріали для досліджень. У експериментах використовувались наступні марки конструкційних сталей, з яких найчастіше виготовляють зубчасті колеса у автомобілебудуванні:

– сталь 18ХГТ; склад – Cr $1,0\div 1,3\%$; Mn $0,8\div 1,1\%$; Ti $0,03\div 0,09\%$; C $0,18\div 0,23\%$; зміцнюється поверхневою нітроцементацією; застосовується в умовах ударних навантажень (шестерні напівосей і коробок передач); критичні температури: $A_{C1} - 740^{\circ}\text{C}$; $A_{C3} - 825^{\circ}\text{C}$;

– сталь 38Х2МЮА; склад – Cr $1,35\div 1,65\%$; Mo $0,15\div 0,25\%$; Al $0,7\div 1,1\%$; C $0,5\div 0,42\%$; зміцнюється поверхневим азотуванням (шестерні, які працюють при високих контактних навантаженнях); критичні температури: $A_{C1} - 800^{\circ}\text{C}$; $A_{C3} - 900^{\circ}\text{C}$;

– сталь 55; склад – Mn $0,5\div 0,8\%$; C $0,52\div 0,60\%$; зміцнюється поверхневим гартуванням; застосовується у шестернях із середньою міцністю серцевини); критичні температури: $A_{C1} - 725^{\circ}\text{C}$; $A_{C3} - 755^{\circ}\text{C}$ [7].

На рисунку 2 подано розрахункову схему зубчастого зачеплення, яка нами використана у дослідженнях стадії припрацювання.

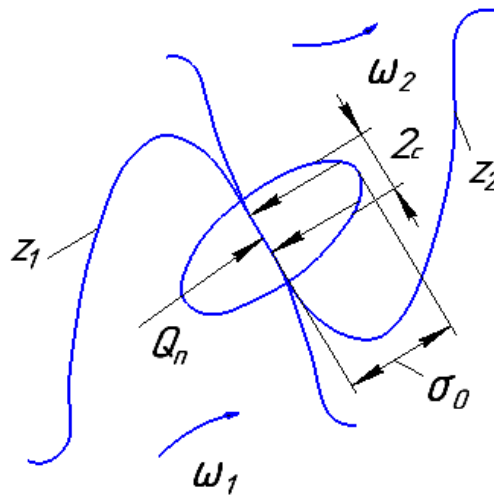


Рис. 2. Схема зубчастого зачеплення

При розрахунках припрацювання зубчастого зачеплення враховували, що у межах профілю зубця створюються змінні умови для зношування. По-перше зміна швидкості відносного ковзання від нуля у полюсі зачеплення до максимуму при контакті ніжки та головки зуба, а по-друге, початковий контакт відбувається по лінії, причому площа контакту визначається умовами деформації (зношування) за Герцем.

Відповідно до закону абразивного зношування, величина лінійного зносу профіля зуба h_0 за оберт зубчастого колеса:

$$h_0 = k\sigma L_1,$$

де L_1 – шлях тертя, який проходять точки контакту зубців за один оберт зубчастого колеса; k – коефіцієнт, що враховує інші фактори контакту пари, що не увійшли до наведеного рівняння.

Тиск на майданчику контакту спряжених зубців z_1 і z_2 розраховується як відношення сили Q у полюсі зачеплення до площі контакту $2bc$.

При дослідженні зношувальної дії, антифрикційних і протизношувальних властивостей триботехнічної системи використовувався розроблений на кафедрі «Виробництво, ремонт та матеріалознавство» стенд, основою якого була контактна пара «сталйна кулька – скляний диск». Стенд було нами модернізовано (рис. 3).



Рис. 3. Стенд (диск з оптичного скла K8 та камера для швидкісного відео – зняті)

Модернізований стенд складається з панелі керування, блоку живлення, автоматичної програмованої коробки швидкостей та ПК. Автоматична програмована коробка швидкостей – спроектована авторами, обладнана магнітним гальмом для різкої зупинки двигуна. Прошивка написана на мові програмування *Python* та дозволяє регулювати кількість обертів двигуна. Початково має режим автоматичного збільшення обертів через деякий проміжок часу до максимального значення та різкої зупинки. Відео із швидкісної камери передається до ПК та обробляється для автоматичного визначення товщини масляної плівки через кольорові кільця Ньютона. Певний колір відповідає певній товщині.

Для дослідження об'ємного зносу у трибомеханічних системах використовувався сучасний трибометр CSM Instruments SA.

Питомі навантаження при дослідженнях складали: 0,15 – 3 МПа при швидкостях 6÷40 м/хв; база випробувань 12 – 105 циклів.

Результати досліджень. Отже, найважливішими факторами, що впливають на час припрацювання, є швидкісно-силові та технологічні. Перші безпосередньо впливають на температуру трибопари, а другі включають матеріал складових пари тертя та методи зміцнення контактуючих поверхневих шарів.

Для побудови математичної моделі процесу припрацювання було обрано метод крутого сходження. При плануванні експерименту проводився вибір кількості та умов проведення дослідів, достатніх для реалізації поставленого завдання із заданою точністю. Процес цієї реалізації називається *оптимізацією*.

Для опису об'єкту дослідження зручно користуватися кібернетичною системою «чорний ящик». На поведінку останнього впливають визначені нами вище фактори x . Це – тиск (силовий фактор) x_1 (МПа), лінійна швидкість x_2 (м/сек) та технологічний фактор (метод зміцнення контактуючих поверхонь матеріалів трибопари) x_3 . На рис. 4 фактори x_n показано стрілками ліворуч, а стрілками праворуч – параметр оптимізації (час припрацювання) y .



Рис. 4. Схема опису об'єкта дослідження.

Рівняння математичної моделі у загальному вигляді записується так:

$$y = \varphi(x_1, x_2, x_3) \quad (2)$$

Така функція називається функцією відгуку, причому кожний фактор у досліді може приймати кілька значень (рівнів). У кожного фактора повинні бути мінімально та максимально можливі значення, між якими цей фактор може змінюватися безперервно чи дискретно.

У нашому випадку ми маємо нелінійну модель, коли один фактор залежить від рівня іншого фактора. Тоді матриця певного факторного експерименту типу 2^3 матиме наступний вигляд (табл. 1).

Виходячи з даної матриці, запишемо рівняння математичної моделі:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3. \quad (3)$$

Для вимірювання відхилення результату досліді від середнього арифметичного значення використовується дисперсія [8].

Для перевірки математичної моделі процесу припрацювання на адекватність було внесено значення параметру оптимізації (часу припрацювання), отриманого експериментальним шляхом при наступному рівні факторів: $x_1 = 0,15$ Мпа; $x_2 = 6$ м/хв; x_3 – зміцнення сталі поверхневим гартуванням, коефіцієнти рівняння (2) $b_0 - b_{123}$ знайшли за рекомендаціями робіт [8, 9, 10]. Виключення грубих помилок експериментів здійснювалось з використанням критерія Стьюдента, а адекватність моделі – при використанні умови із застосуванням критерія Фішера [9].

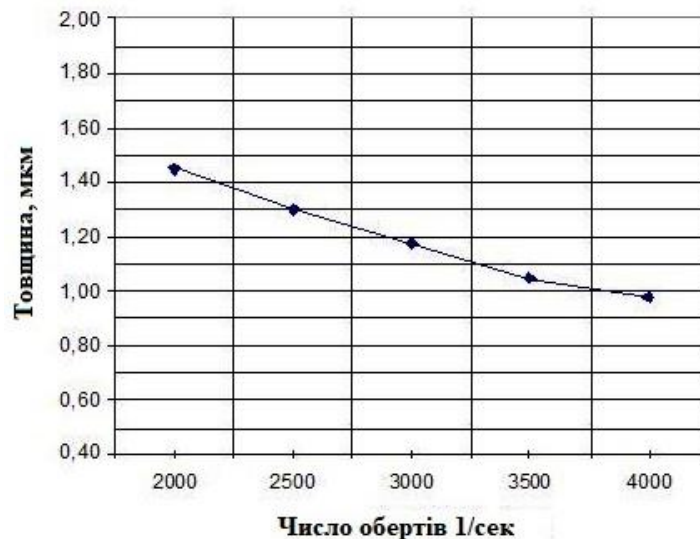


Рис. 5. Залежність товщини плівки від числа обертів.

При збільшенні числа обертів (швидкості обертання) – товщина мастильного шару в зоні контакту зменшується. На це впливають: відцентрова сила, що видавлює оливу на периферію та скорочення ширини «мосту», що з'єднує основну частину мастила та точку контакту.

Подальші експериментальні дослідження були проведені шестеренних насосах. Ці дослідження мали на меті визначити кращий або кращі методи зміцнення поверхонь тертя. Переваги шестеренних над іншими типами насосів (поршневих, пластинчастих, плунжерних та ін.) полягають у використанні у кінематиці гідромашини лише обертального руху та у відсутності безпосереднього контакту робочих органів (зубців шестерень) з корпусом. Це дозволяє суттєво знизити інтенсивність процесів тертя і, отже, значно підвищити надійність насоса. У той же час сучасні шестеренні насоси здатні забезпечувати тиск у гідросистемі до 25 МПа (машини четвертого покоління). Це викликає підвищену увагу до швидкісно-силових та технологічних факторів, які визначають, як було відзначено вище, час припрацювання.

Ефективність того чи іншого методу зміцнення визначалась за залежністю (1) для абразивного зношування. Стендові ресурсні випробування було проведено на стенді СИН 25 (м. Кропивницький, ВАТ «Гідросила») за методикою прискорених випробувань. Стенд було обладнано для періодичного забруднення робочої рідини кварцовим пилом у кількості 0,1% по масі.

Обговорення результатів дослідження. Нагрівання твердих тіл при терті одночасно призводить до різкого підвищення їх хімічної активності, зміні характеру взаємодії тіл не тільки одне з одним, але і з навколишнім середовищем. Високі градієнти температур, що виникають у поверхневих шарах, дуже прискорюють дифузійні процеси, які призводять іноді

до дуже значної зміни атомарного складу у поверхневому шарі тіл тертя, а, отже, і до зміни ряду властивостей поверхонь тертя, у тому числі і вільної поверхневої енергії. Зміни, що відбуваються у поверхневих шарах, обумовлені дифузійними процесами, отримали назву трибомутації. Вміло використовуючи цей процес, можна істотно скорочувати період припрацювання тіл тертя (при скороченні витрат енергії), зменшувати знос виробу під час обкатки вузла тертя і, завдяки цьому, значно збільшити строк його експлуатації.

Таким чином, дослідження показали, що на тривалість припрацювання (в бік його зменшення без зниження якості) позитивно впливає сумісна дія швидкісно-силового та технологічного факторів. Перший з них через ряд проміжних факторів (товщина плівки оливи, температуру, інтенсивність зношування тощо) безпосередньо впливає на тривалість обкатки (припрацювання). Другий залежить від вимог до пари тертя і призначається попередньо.

Для зубчастих пар з незміцнюваною серцевиною, тобто з низькою прогартуваністю, коли застосовуються нелеговані сталі, з екологічних міркувань слід рекомендувати поверхнєве гартування. Недоліками цього методу є значне жолоблення виробів, яке можна виправити заключним шліфуванням жорстким абразивним інструментом.

Пари, які складаються з низькою кількістю легуючих елементів і працюють в умовах ударних навантажень, слід зміцнювати нітроцементациєю. Термічна обробка таких зубчастих коліс здійснюється у середовищах оливи і відзначається середнім зміцненням серцевини. Незначне жолоблення виробів вимагає фінішних операцій еластичним інструментом.

Пари тертя, які працюють в умовах високих контактних навантажень і тому виготовляються із високолегованих сталей, слід зміцнювати йонно-плазмовим термоциклічним азотуванням. Цей процес розроблено у Інституті проблем міцності ім. Г.С. Писаренка. Переваги такого процесу полягають у відсутності жолоблення, тобто відпадає необхідність фінішної механічної обробки.

Висновки і напрямки подальших досліджень. На скорочення тривалості припрацювання найбільш сильно впливають швидкісно-силовий та технологічний фактор. Експериментально встановлено, що при питомих навантаженнях 0,15 – 3 МПа та швидкостях трибопари 6 – 40 м/хв (0,1 – 0,66 м/сек) і методах поверхневого зміцнення і поверхневого гартування, нітроцементация та йонно-плазмові термоциклічне азотування, поєднанням швидкісно-силового та технологічного факторів можна знизити процес припрацювання у 1,5 – 2 рази.

Розроблена математична модель, що поєднує складових цих факторів на процес припрацювання стосовно скорочення останнього.

Модернізовано стенд для експериментальних досліджень триботехнічної системи, який складається з автоматичної коробки швидкостей з магнітним гальмом, блоку живлення, панелі керування та ПК. Прошивка написана на мові програмування Python.

Для подальших досліджень в обраному напрямку перспективними є нанесення на пари тертя зносостійких покриттів товщиною 3 ÷ 10 мкм методами PVD, що містить нітриди та карбіди.

REFERENCES

1. Harkunov D.N. Trybotekhnika: uchebnyk / D.N. Harkunov. M.: Mashynostroenye, 1989. 328 s.
2. Trybotekhnika ta osnovy nadiynosti mashyn: navch. posibnyk / M.F. Dmytrychenko, R.H. Mnatsakanov, O.O. Mikosyanchyk. K.: INFORMA VTODOR, 2006. 216 s.
3. Osnovy trybolohyy (trenye, yzonos, smazka) : Ucheb. dlya tekhn. vuzov / pod obshch. red. A.B. Chychynadze. M.: Mashynostroenye, 2001. 664 s.
4. Shevelya V.V. Trybokhymyya y reolohyya yznosostoykosty: monohrafyya / V.V. Shevelya, V.P. Oleksandrenko. Khmel'nytskyy: KHNU, 2006. 278 s.
5. Nadiynist' sil's'kohospodars'koyi tekhniki: pidruchnyk / M.I. Chernovol, V.YU. Cherkun, V.V. Aulin ta in.: za zah. red. M.I. Chernovola. Kirovohrad: KOD, 2010. 320 s.
6. Dykha O.V. Vuzly tertya mashyn. Rozrakhunky na znosostiykist': navch. posibnyk / O.V. Dykha. Khmel'nyts'kyu: KHNU, 2013. 147 s.
7. Prykladne materialoznavstvo: pidruchnyk / O.V. Sushko, E.K. Posvyatenko, S.V. Korchev, S.I. Lodyakov. Melitopol': TOV «Forward Press», 2019. 352 s.
8. Brodskyuy V.Z. Vvedenye v faktornoe planirovanye éksperymenta / V.Z. Brodskyuy. M.: Nauka, 1976. 223 s.
9. Shenk KH. Teoryya ynzhenernoho éksperymenta, per. s anhl. E.H. Kovalenko. — Pod red. N.P. Buslenko. — M.: Myr, 1972. — 382 s.
10. Mozhovyy O.V., Bohdanova O.I., Hlukhonets' O.O. Osnovy prohnozuvannya nadiynosti i dovhovichnosti transportnykh mashyn: navch. Posibnyk / O.V. Moz'hovyy, O.I. Bohdanova, O.O. Hlukhonets'. Vinnytsya: DPU 2018, 130 s.