

УДК 5621.891

DOI: 10.18372/0370-2197.4(101).18082

О. Є. ЯКОБЧУК, С.С. ЮЦКЕВИЧ, Т.В. КИСЕЛЬОВА, І.О.ЯКОБЧУК,  
К.О.СИДОРЕНКО

Національний авіаційний університет, Україна

## СТАТИСТИЧНИЙ АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИБОТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ ПРИ ТЕРТІ

Ефективні мастильні матеріали відіграють вирішальну роль у забезпеченні безперебійної роботи обладнання в різних галузях промисловості, таких як авіація, машинобудування та автомобілебудування. Їх значення полягає в підвищенні експлуатаційної ефективності, зменшенні часу простою через поломки обладнання та продовженні терміну служби машин. Метою дослідження було оцінити триботехнічні параметри, що впливають на знос у парах тертя, зосередившись на антифрикційних та протизносних властивостях мастил Aero Shell Grease 33 та ВНІНП-286М. За допомогою установки СМЦ-2 в режимі реального часу проводився моніторинг показників трибоконтакту, таких як момент тертя, швидкість обертання роликів і температура мастила. Регресійний і дисперсійний аналіз ANOVA виконано за допомогою програмного забезпечення Statgraphics Centurion. Регресійні моделі корелювали знос зі змінними, такими як робота тертя, товщина шару мастила, коефіцієнт тертя, контактне навантаження і проникнення. Покрокова регресія усунула несуттєві змінні, підвищивши точність прогнозу моделі. ANOVA підтвердив значущість моделі. Дослідження підкреслило практичну застосовність статистичних інструментів для оптимізації ефективності мастильних матеріалів і надійності обладнання, проливаючи світло на ключові змінні, що визначають поведінку зносу в системах тертя.

**Ключові слова:** мастильні матеріали; тертя; знос; статистичний аналіз; регресійний аналіз; ANOVA.

**Вступ.** Ефективні мастильні матеріали, такі як оливи, мастила та охолоджуючі рідини, відіграють ключову роль у забезпеченні безперебійної роботи різних механізмів. Їх значення охоплює різні галузі, включаючи авіаційну, машинобудівну та автомобільну промисловість. Виробництво технологічно досконалих і високоефективних мастильних матеріалів є першочерговим завданням, спрямованим на підвищення надійності машин і механізмів. Це прагнення збігається з метою підвищення загальної експлуатаційної ефективності та мінімізації простоїв через поломку обладнання [1, 2].

Сучасні мастильні матеріали слугують головної меті: зменшити тертя і знос у сполучених частинах машин, механізмів і пристроїв у різних технологічних галузях, тим самим продовжуючи термін експлуатації машин і транспортних засобів. Зрештою, це призводить до збільшення інтервалів між технічним обслуговуванням і ремонтом як авіаційного, автомобільного, морського, так і промислового обладнання [2, 3]. Часто надійність цих взаємодіючих частин залежить від якості використовуваного мастила. Отже, при розробці системи тертя важливо враховувати не тільки матеріали, що використовуються у виробництві, але й властивості самого мастила. На практиці широко застосовуються рідкі, пластичні та тверді мастильні матеріали.

Ефективність мастила залежить від кількох факторів. Перш за все, вона залежить від конструктивних характеристик вузла тертя, таких як його тип, розмір і динаміка руху між контактуючими поверхнями. Крім того, на ефективність впливає система змащування і склад матеріалу поверхонь, з якими він взаємодіє під час роботи. Умови експлуатації вузла тертя та інтервали заміни мастила також відіграють значну роль у визначенні його ефективності.

Мастило широко використовується в різних вузлах тертя механічних систем. Мастило запобігає витіканню мастила з вузла тертя, спрощує його використання і забезпечує хороші ущільнювальні властивості. Такі властивості дозволяють забезпечити оптимальну роботу мастила. Процес змащування може бути динамічним і, відповідно, мастило повинно задовольняти всі режими роботи механізмів [4].

Авіаційні мастила повинні бути надзвичайно надійними, витримувати високі питомі навантаження та екстремальні умови навколишнього середовища за короткий час. Авіаційні мастила піддаються екстремальним умовам експлуатації, таким як умови високої температури до 550°C у підшипниках коліс і опір проникненню води. Так слід зазначити, що мастила для корпусів і колісних підшипників бувають двох типів: на основі літєвого мила/комплексу або на основі глини [5]. Трансмійні мастила для вертольотів обслуговують найважливіші механізми в авіації, несучи силу як тяги, так і підйомної сили [6].

Визначення триботехнічних характеристик мастильних матеріалів залишається пріоритетним напрямком дослідження при розробці та впровадженні нових матеріалів і адаптація їх використання у вже існуючих парах тертя. Окрім того в процесі обробки результатів досліджень триботехнічних характеристик необхідно зрозуміти вплив одного фактору дослідження незалежно від інших факторів на загальну працездатність пари тертя. Це може бути особливо корисно, коли ми хочемо скоригувати або проконтролювати вплив фактору/змінної, що зміщує інші фактори дослідження.

**Мета роботи** полягала в визначенні характерні параметри, які мають суттєвий вплив на знос пар тертя при дослідженні мастильних антифрикційних та протизносних властивостей граничних плівок для мастильних матеріалів Aero Shell Grease 33 та ВНПП - 286М.

#### **Методика експериментальних досліджень.**

Експериментальні дослідження проводилися з використанням установки СМЦ-2, яка дозволила здійснювати моніторинг показників трибоконтакту в режимі реального часу. Ключові параметри, такі як момент тертя, швидкість обертання роликів, температура мастила і падіння напруги в мастильному шарі контакту, систематично реєструвалися і оброблялися на комп'ютері за допомогою програмного забезпечення ProfiLab. Це полегшило графічне представлення в реальному часі, що ілюструє зміни цих показників. Експерименти проводилися в нестационарних умовах тертя: в режимі пуску (4 с) - стаціонарна робота (7 с) - гальмування (3 с) - зупинка (3 с). Контактне навантаження за Герцем становило 250, 400, 550 і 700 МПа. Перші 300 циклів напруження проводили шляхом занурення нижнього ролика в лоток з мастилом і періодичного змащування ролика. Це сприяло достатньому надходженню мастила в зону контакту і запобігало переходу трібосистеми в режим граничного змащування [7].

Для досліджень використовували зразки зі сталі 30ХГСА (HRC 35). Змащування поверхонь здійснювали літєвими мастилами на синтетичній основі Aero Shell Grease 33 та на мінеральній основі Ера ВНІНП-286М.

**Обговорення основних результатів.** Статистична обробка результатів експерименту необхідна для аналізу і інтерпретації отриманих даних з метою забезпечення достовірності та надійності висновків. Це допомагає виявити взаємозв'язки та залежності між змінними, визначити статистичну значущість результатів та оцінити рівень невпевненості вимірювань. Статистичний аналіз допомагає уникнути випадкових помилок, підтвердити або спростувати гіпотези, а також покращити якість експерименту та забезпечити об'єктивність його результатів.

Для статистичної обробки результатів дослідження було використано комплексний настільний продукт Windows для статистичного аналізу, візуалізації даних і прогнозу аналітики Statgraphics Centurion (рис. 1) Даний програмний продукт є потужним і популярним програмним забезпеченням для статистичного аналізу даних. Він має широкий набір функцій і інструментів, які дозволяють виконувати різноманітний статистичний аналіз і обробку даних з високою точністю і надійністю.

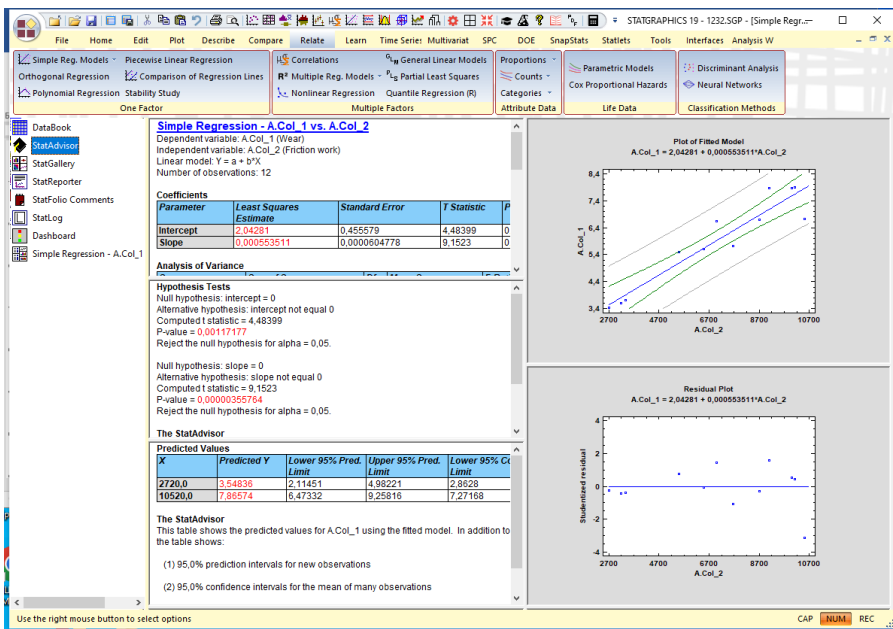


Рис. 1. Інтерфейс програмного продукту для статистичної обробки результатів дослідження.

Подібно до багатьох статистичних програм STATGRAPHICS Centurion містить типові використовувані статистичні процедури, включно з регресією і дисперсійним аналізом (ANOVA). STATGRAPHICS Centurion також включає такі найбільш важливі додаткові процедури:

- 1) розширений регресійний аналіз;
- 2) багатофакторні методи аналізу;
- 3) контроль якості;
- 4) планування експериментів;
- 5) аналіз часових рядів;

б) прогнозування.

Використання регресійного аналізу даних дозволяє здійснити прогнозування щодо вираження взаємозв'язку між змінними, які впливають на явище, і факторами [8]. В даному випадку, регресійний аналіз припускає, що чим більше вибірок даних, тим більше число збігається з середньою відповіддю значення залежної змінної. Безперервний і лінійний зв'язок характеризує залежну змінну. Регресійний аналіз, як правило, спрямований на аналіз глибини зв'язку між конкретною залежною змінною та незалежними змінними. Безперервний і лінійний зв'язок характеризує залежну змінну.

Регресійний аналіз не обмежується вивченням лише однієї незалежної змінної [9]. Ми можемо одночасно розглядати кілька незалежних змінних, щоб перевірити, як вони впливають на нашу залежну змінну. Такий підхід відомий як множинна регресія (або багатомірна регресія). Рівняння множинної регресії має загальний вигляд:

$$y_i = a + b_1x_{1i} + b_2x_{2i} + \dots + e_i, \quad (1)$$

У наведеному рівнянні кожне значення  $b_j$  (цього разу воно називається частковим коефіцієнтом регресії) показує зміну значення  $y$  при одиничній зміні значення відповідної пояснювальної змінної  $x_j$ , за умови, що значення інших пояснювальних змінних не змінюються (тобто вони залишаються незмінними) [10].

Створення моделі передбачає три етапи: 1) оцінка параметрів/коефіцієнтів моделі, 2) оцінка значущості/валідності параметрів моделі та 3) оцінка прогнозовної ефективності моделі.

Для дослідження взаємозв'язку і впливу незалежних змінних було розглянуто загальне лінійне рівняння з декількома змінними:

$$y = a + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_5x_5 + e, \quad (2)$$

де  $y$  – знос (*wear*) випереджаючої і відстаючої поверхонь в нестационарних умовах тертя, мкм,  $a$  – інтерсепт визначає значення на осі  $y$ , коли всі змінні моделі дорівнюють 0,  $b_j$  – коефіцієнт регресії (нахил) для змінної  $x_j$ ,  $x_1$  – робота тертя (*work*), Дж/мм<sup>2</sup>,  $x_2$  – товщина (*thickness*) граничних мастильних шарів, мкм,  $x_3$  – коефіцієнта тертя (*friction*)  $x_4$  – контактне навантаження (*load*), МПа,  $x_5$  – пенетрація при 25 °С, (*penetration*), 10<sup>-1</sup> мм і  $e$  – помилка рівняння регресії.

Умови проведення багатofакторного та регресійного аналізів передбачають ряд факторів та вимог, які слід враховувати, щоб гарантувати правильність та адекватність результатів аналізу. Ці допущення допомагають забезпечити коректність та правдоподібність результатів виконаних аналізів.

Для проведення багатofакторного і дисперсійного аналізів ANOVA дослідних даних скористаємося STATGRAPHICS Centurion [11]. Техніка ANOVA застосовується, коли є дві або більше двох незалежних груп. Процедура ANOVA використовується для порівняння середніх значень груп порівняння [12]. ANOVA — це статистичний метод, який включає  $F$ -тест,  $T$ -тест, ступені вільності, коефіцієнт детермінації та стандартну помилку для аналізу вимірювань залежно від кількох змінних, що діють одночасно, щоб визначити, які види змінних є важливими для оцінки оптимальних результатів [13]. При використанні даного аналізу необхідно враховувати розміри вибірки, середні значення вибірки та стандартні відхилення вибірки в кожній із груп вибірки.

Для перевірки гіпотези про існування кореляційної залежності між незалежними та залежними змінними дослідження проведено  $n$  незалежних спостережень, результати яких подані в кореляційній табл. 1.

Дана таблиця дозволяє нам зробити аналіз  $n = 24$  спостережень за  $k = 5$  факторами.

Процедуру Multiple Variable Analysis програмного продукту STATGRAPHICS Centurion було використано для обробки результатів багатфакторного аналізу. Ця процедура дозволила розрахувати різні статистичні дані і побудувати графіки.

За даними табл. 1 побудовано матрицю діаграм розсіювання двох змінних для всіх пар змінних (рис. 2).

Таблиця 1

### Дані для багатфакторного і лінійного регресійного аналізу

Мастильний матеріал	Знос ( <i>wear</i> ), мкм	Робота тертя, ( <i>work</i> ) Дж/мм <sup>2</sup>	Товщина ( <i>thickness</i> ) граничних мастильних шарів, мкм	Коефіцієнт тертя ( <i>friction</i> )	Контактне навантаження ( <i>load</i> ), МПа	Пенетрація, 10 <sup>-1</sup> мм
Ера ВНІШП - 286М	3,43	2720	1,4	0,014	250	230
	5,5	5510	0,45	0,03	400	
	6,65	7000	0,12	0,041	550	
	7,86	9100	0,08	0,045	700	
	3,6	3200	1,5	0,015	250	
	5,6	6500	0,5	0,032	400	
	6,7	8700	0,15	0,045	550	
	7,86	10000	0,1	0,051	700	
	3,71	3360	1,68	0,017	250	
	5,71	7670	0,6	0,035	400	
	6,73	10520	0,15	0,05	550	
7,88	10120	0,11	0,051	700		
Aero Shell Grease 33	2,7	850	2,3	0,009	250	284
	3,25	1450	2,1	0,013	400	
	4,05	3450	1,18	0,017	550	
	4,45	4160	0,73	0,022	700	
	2,8	1000	2,8	0,01	250	
	3,3	1800	2,3	0,015	400	
	4,1	3800	1,5	0,019	550	
	4,6	5200	0,8	0,025	700	
	2,9	1080	2,95	0,01	250	
	3,3	2010	2,65	0,016	400	
	4,12	4370	1,63	0,022	550	
4,63	5770	0,93	0,03	700		

Цей графік показує всі двовимірні діаграми розсіювання для змінних, обраних для аналізу. Кожна пара змінних відкладається двічі, один раз з першою змінною на осі  $X$ , а другий раз з нею на осі  $Y$ . На всіх графіках у першому ряду на осі  $Y$  відкладено *wear*. В першому стовпчику теж маємо *wear*, відкладений по осі  $X$ . Це графічний еквівалент кореляційної матриці, який допомагає визначити, які змінні найсильніше корелюють з іншими.

Для оцінки валідності кожної моделі використовували значення  $R^2$  і  $P$ -значення.

$R^2$  – загальна міра відповідності (відносна прогностична здатність). Це статистичний показник того, наскільки добре модель регресії наближає фактичні дані. Значення  $R^2$  змінюється між 0 і 1, і чим ближче значення до 1, тим точніша модель [11].

$P$ -значення використовували для оцінки статистичної значущості регресійних термінів для кожної відповіді; тобто при рівні значущості приблизно 5 % ( $\alpha = 0,05$ ), що представляє довірчий інтервал 95 %, змінні із  $P$ -значення, рівними або меншими за 0,05, будуть визначені як значущі. Ця процедура використовується для зменшення/усунення незначущих змінних у моделі.

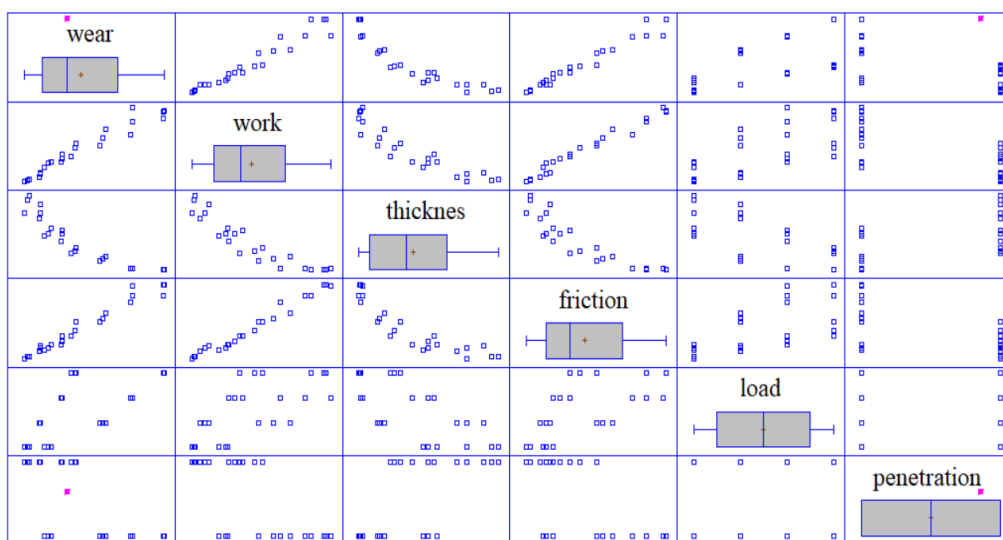


Рис. 2. Матриця діаграм розсіювання двох змінних для всіх пар змінних.

Для оптимізації процедури побудови регресійної моделі і її аналізу було виконано покроковий регресійний аналіз числових даних дослідження [14]. В такому аналізі змінні з найвищими  $P$ -значення видаляються з регресійної моделі, щоб зменшити складність моделі з мінімальним впливом на її якість. Під час процедури скорочення кількості змінних, вони видаляються індивідуально, оскільки кожен крок скорочення призводить до зміни відхилення моделі, що призводить до нових значень  $F$ -критерію та  $P$ -значення. Щоб зберегти цілісність моделі, змінні видаляються лише тоді, коли вони не з'являються у взаємодіях вищого порядку [15, 16, 17].

В табл. 2 наведено результати параметрів множинного регресійного аналізу для всіх прийнятих змінних вибірки відповідно до початкової гіпотези побудови регресійної моделі [14].

Оскільки  $P$ -значення в табл. 2 (analysis of variance (ANOVA) – дисперсійний аналіз) менше 0,05, то існує статистично значущий зв'язок між змінними на рівні довірчого інтервалу 95 %.

Коефіцієнт детермінації  $R^2$  показує, що модель, як вона була підібрана, пояснює 97,6833% варіабельності зносу. Скоригований статистика  $R^2$ , яка більше підходить для порівняння моделей з різною кількістю незалежних змінних, становить 97,0397%. Стандартна похибка оцінки показує, що стандартне відхилення залишків дорівнює 0,291591. Це значення можна використати для побудови меж прогнозування для нових спостережень.

Таблиця 2

**Множинний регресійний аналіз результатів спостережень**

Параметр	Оцінка параметра	Стандартне відхилення оцінки	T -статистика (Стьюдента)	$P$ -значення Максимальний рівень значимості
$a$ , constant (постійна)	6,06675	1,48821	4,07653	0,0007
$x_1$ , work	-0,00016599	0,000137829	-1,20432	0,2441
$x_2$ , thickness	0,0705714	0,232181	0,30395	0,7647
$x_3$ , friction	111,297	27,1851	4,09403	0,0007
$x_4$ , load	0,00277473	0,00119579	2,32041	0,0323
$x_5$ , penetration	-0,018577	0,00740576	-2,50845	0,0219

Оскільки  $P$ -значення більше 0,05, то на рівні довірчої ймовірності 95,0% немає ознак послідовної автокореляції у відхиленнях.

При визначенні того, чи можна спростити модель, звертаємо увагу на те, що  $P$ -значення більше 0,05 для незалежних змінних становить 0,7647, що належить товщині мастильних матеріалів і 0,2441 належить роботі пар тертя, ці члени моделі не є статистично значущим на рівні довірчої ймовірності 95,0% або вище, а отже, слід розглянути можливість вилучення товщин мастильних матеріалів і роботи пар тертя з моделі.

В цьому випадку є доцільним використання зворотного покрокового відбору – виконується зворотна покрокова регресія. Починаючи з моделі, яка включає всі змінні, процедура видаляє змінні по одній, якщо вони не є статистично значущими.

На кожному кроці покрового відбору ми оцінюємо два характеристичні коефіцієнти моделі. Коефіцієнт детермінації  $R^2$  описує якість моделі і постійно зменшується з вилученням факторів.

Виконання покрового відбору змінних дозволив провести покрововий регресійний аналіз і побудову нової статистично значущої моделі. Результати покровового регресійного аналізу наведено в табл. 3 та 4.

Таблиця 3

**Множинний покрововий регресійний аналіз результатів спостережень**

Параметр	Оцінка параметра	Стандартне відхилення оцінки	T-статистика (Стьюдента)	P-значення Максимальний рівень значимості
$a$ , constant (постійна)	5,1783	1,22057	4,24251	0,0004
$x_3$ , friction	83,0066	12,3415	6,7258	0,0000
$x_4$ , load	0,00207	0,000771	2,67978	0,0144
$x_5$ , penetration	-0,0138	0,004697	-2,9353	0,0082

Коефіцієнт детермінації  $R^2 = 97,4438$  %.

Скоригований Коефіцієнт детермінації, приведений до числа ступенів свободи  $R^2_{d.f.}$  (скориговано для d.f.) = 97,0604 %.

$R^2$  (прогнозований) = 95,9712 %.

Стандартна похибка оцінювання = 0,290572.

Середня абсолютна похибка – середнє значення відхилень = 0,210161.

Значення автокореляції залишків із лагом 1 = -0,168019.

Таблиця 4

**Дисперсійний аналіз результатів спостережень**

Джерело дисперсії	Сума квадратів	Df, Число ступенів свободи	Середній квадрат	F-критерій	P-значення
По моделі регресії	64,372	3	21,4573	254,14	0,0000
Відхилення від моделі регресії	1,68865	20	0,0844323		
Total (Corr.)	66,0607	23			



Локальні максимуми в  $R^2_{d.f.}$  позначені червоним кольором і можуть розглядатися як придатні моделі з високою ефективністю завдяки гарному співвідношенню якості моделі та кількості параметрів. Якщо чіткого максимуму знайти не вдається, раптове падіння обох коефіцієнтів також може вказувати на цікаві моделі. У цьому випадку параметри, що залишилися, роблять більший внесок у якість моделі, ніж ті, які щойно були видалені.

Вихідні дані показують результати аналізу методом зворотної покрокової регресії скоригованої моделі множинної лінійної регресії для опису зв'язку між зносом і 5 незалежними змінними. Остаточне рівняння побудованої моделі має вигляд

$$\begin{aligned} wear = 5,1783 + 83,0066 * friction + 0,00206741 * load - \\ - 0,0137879 * penetration, \end{aligned} \quad (3)$$

або

$$y = 5,1783 + 83,0066 \cdot x_3 + 0,00206741 \cdot x_4 - 0,0137879 \cdot x_5$$

Оскільки  $P$ -значення в таблиці ANOVA менше 0,05, то існує статистично значущий зв'язок між змінними на рівні довірчого інтервалу 95,0%.

Визначаючи, чи можна спростити модель, зазначимо, що найвище  $P$ -значення для незалежних змінних становить 0,0144, що належить до навантаження. Оскільки  $P$ -значення менше 0,05, цей член є статистично значущим на рівні довірчої ймовірності 95,0%. Отже, не потрібно вилучати жодної змінної з моделі.

**Висновки.** Це дослідження було проведено для оцінки взаємозв'язку і кореляції між факторами/змінними дослідження, такими як робота тертя, товщина мастильних шарів, коефіцієнту тертя, навантаження і пенетрація, як властивостей мастильного матеріалу і їх вплив на знос в парі тертя.

Було визначено, що робота тертя, товщина мастильних шарів не є статистично значущим на рівні довірчої ймовірності 95,0% або вище, а отже, були вилучені із подальшого статистичного аналізу. За результатами аналізу Побудовано регресійну модель зносу з використанням множинного регресійного аналізу. Проведено оцінку параметрів моделі для кожної незалежної змінної

Підтверджено адекватність побудованої моделі за допомогою аналізу дисперсії (ANOVA). Представлено результати дисперсійного аналізу для моделі, що підтверджують статистичну значущість зв'язку між змінними.

Проведено розрахунок коефіцієнтів кореляції між незалежними змінними. Кореляційна матриця показує, які змінні мають сильний зв'язок між собою.

### Список літератури

1. Дмитриченко М. Ф. Триботехніка та основи надійності машин: Навчальний посібник / М. Ф. Дмитриченко, Р. Г. Мнацаканов, О. О. Мікосянчик. – Київ: Інформавтодор, 2006. – 216 с.
2. Мнацаканов Р.Г., Мікосянчик О.О., Якобчук О.Є., Хімко А.М., Харченко О.В. Огляд класифікацій за фізико-механічними та експлуатаційними властивостями мастил закордонного виробництва. Проблеми тертя та зношування. – 2020. – № 3 (88). – С. 52-70. DOI: [https://doi.org/10.18372/0370-2197.3\(88\).14920](https://doi.org/10.18372/0370-2197.3(88).14920).
3. Закалов, О.В. Основи тертя і зношування в машинах: Навчальний посібник / О.В. Закалов, І.О. Закалов. – Тернопіль: Видавництво ТНТУ ім. І.Пулую, 2011. – 322 с.

4. . N. DeLaurentis, A. Kadiric, P. Lugt, P. Cann The influence of bearing grease composition on friction in rolling/sliding concentrated contacts Tribol Int, 94 (2016), pp. 624-632.
5. Lansdown, A.R. & Lee, S.. (2010). Aviation Lubricants. 10.1023/b105569\_11. [https://www.researchgate.net/publication/226451916\\_Aviation\\_Lubricants](https://www.researchgate.net/publication/226451916_Aviation_Lubricants).
6. Мікосянчик О.О., Якобчук О.Є., Педан Е.В., Березівський Н.М. Вплив ступеня окислення на протизношувальні властивості авіаційних олив. Проблеми тертя та зношування. – 2023. – № 2 (99). – С. 4-13. DOI: [https://doi.org/10.18372/0370-2197.2\(99\).17611](https://doi.org/10.18372/0370-2197.2(99).17611).
7. Mnatsakanov, R.G., Mikosianchyk, O.A., Yakobchuk, O.E. et al. Lubricating Properties of Boundary Films in Tribosystems under Critical Operation Conditions. J. Mach. Manuf. Reliab. 50, 229–235 (2021). <https://doi.org/10.3103/S1052618821030110>
9. Mode choice EunSu Lee Ph.D., CPIM, CSCP, GISP, in Geographic Information Systems for Intermodal Transportation, 2023 <https://www.sciencedirect.com/topics/social-sciences/regression-analysis>.
10. J. Fox. Applied Regression Analysis and Generalized Linear Models, Third Edition, SAGE, 2016, 817 p.
11. Regression, Linear and Nonlinear J. Pearce, in International Encyclopedia of Human Geography, 2009.
12. KEITH TAN. ANOVA table (ANOVA) [Електронний ресурс] / KEITH TAN // PrepNuggets – Режим доступу до ресурсу: <https://prepnuggets.com/glossary/anova-table/>.
13. Lisa Sullivan. Hypothesis Testing - Analysis of Variance (ANOVA) [Електронний ресурс] / Lisa Sullivan // Boston University School of Public Health – Режим доступу до ресурсу: [https://sphweb.bumc.bu.edu/otlt/mph-modules/bs/bs704\\_hypothesistesting-anova/bs704\\_hypothesistesting-anova\\_print.html](https://sphweb.bumc.bu.edu/otlt/mph-modules/bs/bs704_hypothesistesting-anova/bs704_hypothesistesting-anova_print.html).
14. Scheffe, H. (1999). The analysis of variance (Vol. 72). John Wiley & Sons.
15. Multiple Regression, 2019. – 32 с. – (Revised: 8/11/2020).
16. Strobl, P.; Schermer, E.; Groetsch, D.; Pointner-Gabriel, L.; Voelkel, K.; Pflaum, H.; Stahl, K. Identification and Validation of Linear Friction Models Using ANOVA and Stepwise Regression. Lubricants 2022, 10, 286. <https://doi.org/10.3390/lubricants10110286>.
17. Strobl P, Schermer E, Groetsch D, Pointner-Gabriel L, Voelkel K, Pflaum H, Stahl K. Identification and Validation of Linear Friction Models Using ANOVA and Stepwise Regression. Lubricants. 2022; 10(11):286. <https://doi.org/10.3390/lubricants10110286>.
18. Strobl, Patrick, Elias Schermer, Daniel Groetsch, Lukas Pointner-Gabriel, Katharina Voelkel, Hermann Pflaum, and Karsten Stahl. 2022. "Identification and Validation of Linear Friction Models Using ANOVA and Stepwise Regression" Lubricants 10, no. 11: 286. <https://doi.org/10.3390/lubricants10110286>.

Стаття надійшла до редакції 30.11.2023.

**Якобчук Олександр Євгенійович** – старший викладач кафедри конструкції літальних апаратів, Національний авіаційний університет, пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, тел.: +38 044 406 75 97, E-mail: [a-yak@ukr.net](mailto:a-yak@ukr.net), <https://orcid.org/0000-0002-3452-1264>.

**Юцкевич Святослав Сергійович** – канд. техн. наук, доцент, завідувач кафедри конструкції літальних апаратів, Національний авіаційний університет, пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, тел.: +38 044 406 77 70, E-mail: [yutskevych@nau.edu.ua](mailto:yutskevych@nau.edu.ua), <https://orcid.org/0000-0001-6650-4453>.

**Кисельова Тетяна Вячеславівна** – здобувач вищої освіти освітнього ступеня магістр за спеціальністю 131 «Прикладна механіка», освітньо-професійна програма «Прикладна механіка, стандартизація та оцінка якості технічних систем», Національний авіаційний університет, пр. Любомира Гузара,1, м.Київ, Україна, 03058, E-mail: [Kiseleva.tatiana750511@gmail.com](mailto:Kiseleva.tatiana750511@gmail.com), <https://orcid.org/0009-0000-7987-5886>.

**Якобчук Іван Олександрович** – здобувач вищої освіти освітнього ступеня бакалавр за спеціальністю 123 «Комп’ютерна інженерія», освітньо-професійна програма «Системне програмування», Національний Авіаційний Університет, пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, E-mail: [7426885@stud.nau.edu.ua](mailto:7426885@stud.nau.edu.ua), <https://orcid.org/0009-0000-0073-4993>.

**Сидоренко Кирило Олександрович** – здобувач вищої освіти освітнього ступеня бакалавр за спеціальністю 134 «Авіаційна та ракетно-космічна техніка», освітньо-професійна програма «Обладнання повітряних суден», Національний Авіаційний Університет, пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, E-mail: [6885190@stud.nau.edu.ua](mailto:6885190@stud.nau.edu.ua), <https://orcid.org/0009-0000-2854-3902>.

*O. Ye. YAKOBCHUK, S.S. YUTSKEVYCH, T.V. KYSELOVA, I.O. YAKOBCHUK, K.O. SYDORENKO*

## STATISTICAL ANALYSIS OF THE RESULTS OF STUDYING THE TRIBOTECHNICAL CHARACTERISTICS OF LUBRICANTS UNDER FRICTION

Effective lubricants play a crucial role in ensuring machinery's smooth operation across diverse industries like aviation, engineering, and automotive sectors. Their significance lies in enhancing operational efficiency, reducing downtime due to equipment breakdowns, and extending machinery lifespan. These lubricants primarily target friction and wear reduction, thereby increasing intervals between maintenance and repair cycles in various equipment. The research aimed to evaluate the specific parameters impacting wear in friction pairs, focusing on the lubricating antifriction and anti-wear properties of Aero Shell Grease 33 and VNIINP-286M. Using an CMIQ -2 installation, real-time monitoring of tribocontact indicators like friction torque, roller speed, and lubricant temperature was conducted. The study considered non-stationary friction conditions, varied contact loads, and different lubricant application methods to prevent boundary lubrication. Statistical processing via Statgraphics Centurion software involved regression analysis and ANOVA. Regression models correlated wear with variables like friction work, lubricant layer thickness, friction coefficient, contact load, and penetration. Stepwise regression eliminated non-significant variables, refining the predictive model's accuracy. ANOVA validated the model's significance. The outcomes highlighted variables like load and friction as significant contributors to wear in friction pairs, leading to a more comprehensive understanding of lubricant performance in various operational conditions. The study emphasized the practical applicability of statistical tools in optimizing lubricant efficiency and machinery reliability, shedding light on key variables driving wear behavior in friction systems.

**Keywords:** lubricants; friction; wear; statistical analysis; regression analysis; ANOVA.

### Referenses

1. Dmitrichenko M. F. Tribotekhnika ta osnovi nadijnosti mashin: Navchal'nij posibnyk / M. F. Dmitrichenko, R. G. Mnacakanov, O. O. Mikosjanchik. – Kiiiv: Informavtodor, 2006. – 216 s.
2. Mnatsakanov R.G., Mikosianchyk O.O., Yakobchuk O.Ye., Khimko A.M., Kharchenko O.V. Review of oils classifications of foreign production by physical-mechanical and operational properties. Problems of Friction and Wear, – № 3 (88). – C. 52-70. DOI: [https://doi.org/10.18372/0370-2197.3\(88\).14920](https://doi.org/10.18372/0370-2197.3(88).14920).
3. Zakalov, O.V. Osnovy tertia i znoshuvannia v mashynakh: Navchalnyi posibnyk / O.V. Zakalov, I.O. Zakalov. – Ternopil: Vydavnytstvo TNTU im. I.Puliuia, 2011. – 322 s.
4. DeLaurentis N., Kadiric A., Lugt P., Cann P. The influence of bearing grease composition on friction in rolling/sliding concentrated contacts Tribol Int, 94 (2016), pp. 624-632.
5. Lansdown, A.R. & Lee, S.. (2010). Aviation Lubricants. 10.1023/b105569\_11. [https://www.researchgate.net/publication/226451916\\_Aviation\\_Lubricants](https://www.researchgate.net/publication/226451916_Aviation_Lubricants).
6. Mikosianchyk O.O., Yakobchuk O.Ye., Pedan YE. V., Berezivskyi N. M. Influence of oxidation degree on antiwear properties aviation oils. Problems of Friction and Wear. – 2023. – № 2 (99). – C. 4-13. DOI: [https://doi.org/10.18372/0370-2197.2\(99\).17611](https://doi.org/10.18372/0370-2197.2(99).17611).
7. Mnatsakanov, R.G., Mikosianchyk, O.A., Yakobchuk, O.E. et al. Lubricating Properties of Boundary Films in Tribosystems under Critical Operation Conditions. J. Mach. Manuf. Reliab. 50, 229–235 (2021). <https://doi.org/10.3103/S1052618821030110>

8. Mode choice EunSu Lee Ph.D., CPIM, CSCP, GISP, in Geographic Information Systems for Intermodal Transportation, 2023 <https://www.sciencedirect.com/topics/social-sciences/regression-analysis>.

9. J. Fox. Applied Regression Analysis and Generalized Linear Models, Third Edition, SAGE, 2016, 817 p.

10. Regression, Linear and Nonlinear J. Pearce, in International Encyclopedia of Human Geography, 2009.

11. KEITH TAN. ANOVA table (ANOVA) / KEITH TAN // PrepNuggets – <https://prepnuggets.com/glossary/anova-table/>.

12. Lisa Sullivan. Hypothesis Testing - Analysis of Variance (ANOVA) [/ Lisa Sullivan // Boston University School of Public Health: [https://sphweb.bumc.bu.edu/otlt/mph-modules/bs/bs704\\_hypothesistesting-anova/bs704\\_hypothesistesting-anova\\_print.html](https://sphweb.bumc.bu.edu/otlt/mph-modules/bs/bs704_hypothesistesting-anova/bs704_hypothesistesting-anova_print.html).

13. Scheffe, H. (1999). The analysis of variance (Vol. 72). John Wiley & Sons.

14. Multiple Regression, 2019. – 32 c. – (Revised: 8/11/2020).

15. Strobl, P.; Schermer, E.; Groetsch, D.; Pointner-Gabriel, L.; Voelkel, K.; Pflaum, H.; Stahl, K. Identification and Validation of Linear Friction Models Using ANOVA and Stepwise Regression. Lubricants 2022, 10, 286. <https://doi.org/10.3390/lubricants10110286>.

16. Strobl P, Schermer E, Groetsch D, Pointner-Gabriel L, Voelkel K, Pflaum H, Stahl K. Identification and Validation of Linear Friction Models Using ANOVA and Stepwise Regression. Lubricants. 2022; 10(11):286. <https://doi.org/10.3390/lubricants10110286>.

17. Strobl, Patrick, Elias Schermer, Daniel Groetsch, Lukas Pointner-Gabriel, Katharina Voelkel, Hermann Pflaum, and Karsten Stahl. 2022. "Identification and Validation of Linear Friction Models Using ANOVA and Stepwise Regression" Lubricants 10, no. 11: 286. <https://doi.org/10.3390/lubricants10110286>.

**Yakobchuk Oleksandr Yevheniyovych** – Senior teacher on Aircraft Design Department of National Aviation University, 1 Lubomyra Huzar Ave., Kyiv, Ukraine, 03058, E-mail: [a-yak@ukr.net](mailto:a-yak@ukr.net), <https://orcid.org/0000-0002-3452-1264>

**Yutskevych Sviatoslav Sergriyovych** – PhD, Associate Professor, Head of the Aircraft Design Department, 1 Lubomyra Huzar Ave., Kyiv, Ukraine, 03058, E-mail: [yutskevych@nau.edu.ua](mailto:yutskevych@nau.edu.ua), <https://orcid.org/0000-0001-6650-4453>.

**Kyselova Tetyana Vyacheslavivna** – graduate of higher education with a master's degree in specialty 131 «Applied Mechanics», educational and professional program «Applied Mechanics, Standardization and Quality Assessment of Technical Systems», National Aviation University, 1 Lubomyr Huzar Ave., Kyiv, Ukraine, 03058, E-mail: [Kiseleva.tatiana750511@gmail.com](mailto:Kiseleva.tatiana750511@gmail.com), <https://orcid.org/0009-0000-7987-5886>.

**Yakobchuk Ivan Oleksandrovych** – Graduate of higher education with a bachelor's degree in specialty 123 "Computer Engineering", educational and professional program "System Programming", National Aviation University, 1 Lyubomyr Huzar Ave., Kyiv, Ukraine, 03058, E-mail: [7426885@stud.nau.edu.ua](mailto:7426885@stud.nau.edu.ua), <https://orcid.org/0009-0000-0073-4993>.

**Sydorenko Kyrylo Oleksandrovych** – Graduate of higher education with a bachelor's degree in specialty 134 «Aviation and Rocket-Space Technology», educational and professional program «Aircraft Equipment», National Aviation University, 1 Lubomyr Huzar Ave., Kyiv, Ukraine, 03058, E-mail: [6885190@stud.nau.edu.ua](mailto:6885190@stud.nau.edu.ua), <https://orcid.org/0009-0000-2854-3902>.