

## Експериментальні дослідження трибосистем при наявності фулеренів в мастильному матеріалі. Частина 3. За конструктивними параметрами трибосистем

А.Г. Кравцов

*Харківський національний технічний університет сільського господарства  
ім. Петра Василенка, (м.Харків, Україна)  
email:kravcov\_84@ukr.net; ORCID: 0000-0003-3103-6594*

У роботі представлені результати експериментальних досліджень і теоретичні криві зміни об'ємної швидкості зношування та коефіцієнта тертя при зміні конструкції трибосистем та концентрації фулеренових композицій в змащувальному матеріалі. Конструкцію трибосистем оцінювали двома параметрами: величиною комплексного параметра, який характеризує внутрішню тертя структури сполучених матеріалів та величиною площі тертя і об'ємів матеріалу, які розташовані під площинами тертя. Такий параметр враховується коефіцієнтом форми трибосистеми.

Експериментальним шляхом доведено лінійна монотонна залежність зменшення об'ємної швидкості зношування від величини комплексного параметру на 23,0 - 29,2% при застосуванні фулеренових композицій різної концентрації. Встановлено, що залежності зміни коефіцієнта тертя мають немонотонний характер. При поєднанні матеріалів в трибосистемі до величини комплексного параметру, який дорівнює 1600, коефіцієнта тертя зменшується до 32,4%. При величинах комплексного параметру, які перевищують значення 1600, ефект зниження коефіцієнта тертя збільшується до 71%. Зроблено висновок, що застосування фулеренових композицій дасть найбільший ефект для трибосистем, де сполучені матеріали перевищують значення комплексного параметру 1600. Даний висновок розкриває практичне значення роботи.

Результати експериментальних досліджень і теоретичні криві зміни об'ємної швидкості зношування і коефіцієнта тертя при зміні геометричних розмірів трибосистеми - коефіцієнта форми  $K_f$  та концентрації фулеренових композицій, показали, що збільшення площі тертя, при одночасному введенні фулеренових композицій, сприяє зниженню швидкості зношування на 22,8 - 28,7%.

Доведено, що раціональною концентрацією при зміні конструктивних параметрів трибосистем може виступати теоретично обґрунтована і експериментально підтверджена середня величина: 0,75 гр/кг фулеренів + 99,25 гр/кг рослинної високоолеїнової олії, в якості розчинника, з подальшим додаванням в базову оливу. Використання даного висновку дозволить раціонально застосовувати фулеренові композиції для розробки новітніх змащувальних матеріалів.

**Ключові слова:** фулерени; фулеренові композиції; змащувальні матеріали; рослинні олії; конструкція трибосистеми; внутрішнє тертя структури матеріалів; коефіцієнт форми трибосистеми; об'ємна швидкість зношування; коефіцієнт тертя

**Постановка проблеми та її актуальність.** На сьогоднішній день застосування фулеренів в рідких змащувальних матеріалах можливо в двох варіантах: перший варіант як добавка дрібнодисперсного порошку в змащувальні матеріали; другий варіант - попереднє розчинення дрібнодисперсного порошку фулеренів в розчиннику і додавання отриманої композиції в рідкий мастильний матеріал.

Якщо застосовувати другий варіант, то в складі базового змащувального матеріалу можливе утворення кластерів і міцел, де ядром є молекула або декілька молекул фулерену. Такі сформовані агрегати будуть відрізнятися від твердих дрібнодисперсних частинок, поведінка яких в складі рідин змінюється. У цьому випадку, на думку багатьох дослідників, поведінка структури рідкого змащувального матеріалу буде схожа на реологію розчинів полімерів. Принципова від-

мінність розчинів макромолекул полімерів від розчинів твердих частинок у складі змащувальних матеріалів складається в появі значних пружних властивостей у останніх.

Наявність в змащувальному матеріалі дисперсної фази у вигляді кластерів і міцел, які утворюються навколо молекул фулерену, створює на поверхні тертя поверхневі зносостійкі структури, які сприймають і релаксують напруження на плямах фактичного контакту. Такий напрям застосування фулеренів дає можливість розробляти нові змащувальні матеріали для експлуатації трибосистем з покращеними протизносними та антифрикційними властивостями.

**Аналіз останніх публікацій по даній проблемі.** Робота [1] присвячена застосуванню наноматеріалів у вигляді фулеренових композицій для експлуатації двигунів внутрішнього згорання.

При вивченні механохімічних реакцій за участю мінеральних часток, поверхнево-активних речовин, нанорозмірних частинок (фулеренів), автотрами роботи була виявлена важлива роль таких композицій в механоактивації металевих поверхонь при терті, здатних вступати у взаємодію з новоствореними активними фрагментами і металевими поверхнями, що труться. Дослідження, представлені в роботі [1], свідчать, що протизносний ефект, що спостерігається при введенні в мастильне середовище (моторну оливу) високодисперсного порошку з нанорозмірними частинками фулеренової сажі, обумовлений їх впливом не на мастильне середовище, а на поверхню тертя. Оскільки процес утворення на поверхні тертя протизношувальної плівки є кінетичним, то природно, що позитивний вплив на зносостійкість поверхонь нової мастильної композиції проявляється не відразу, а через деякий, іноді досить тривалий період припрацювання.

Аналіз публікацій з використання наноматеріалів, як добавок до змащувальних матеріалів [2-6], показав, що фулерени і фулеренові сажі можуть успішно застосовуватися в якості антифрикційних, протизносних і протизадирних добавок. Авторами робіт наведено теоретичне та експериментальне підтвердження позитивного ефекту від застосування фулеренів в якості добавок до змащувальних матеріалів, але в деяких експериментах спостерігався незначний ефект, або його відсутність.

В роботі [7] були проведені дослідження можливості поліпшення триботехнічних характеристик пластичних мастил і моторних олів, що випускаються серійно, шляхом введення вуглецевих наноматеріалів. Авторами роботи висувають таку гіпотезу, що вуглецеві наноматеріали мають гарну теплопровідність (що може сприяти зниженню температури в зоні трибоспряжень), а також високу механічну і хімічну стійкість, що ймовірно, дасть синергетичний ефект з мастильними матеріалами. Поряд з пластичними мастилами було проаналізовано вплив введення вуглецевих наночастинок на триботехнічні характеристики моторної оливи M10 – Г<sub>2к</sub>. В якості присадок застосовували вуглецеві нанокластери з високими показниками чистоти: фулеренову сажу з вмістом фулеренів не менше 10%; суміші фулеренів; фулерени C<sub>60</sub> з чистотою від 99 до 99,9 мас. %. Авторами роботи відмічають позитивний ефект від застосування вуглецевих наноматеріалів, але не наводять межі їх ефективного та раціонального застосування. В роботі не розкрито взаємозв'язок триботехнічних характеристик з особливостями використання нових змащувальних матеріалів.

Деякі важливі аспекти використання наночастинок наведено в роботі [8]. При модифікації мастильних матеріалів автори враховують такі чинники: розмір наночастинок, форму, структуру,

модифікацію поверхні тертя, концентрацію частинок, фізичні і хімічні властивості поверхонь тертя. Було відмічено, що при додаванні нанодобавок до мастильних матеріалів, навіть при низьких концентраціях, значно знизилася коефіцієнти тертя і швидкість зношування. Крім того, вуглецеві нанотрубки і графен екологічно чисті і безпечні матеріали. На підставі проведених досліджень автори позитивно оцінюють перспективи використання зазначених наноматеріалів для модифікації мастильних матеріалів.

Проведений аналіз літературних джерел вітчизняних і зарубіжних вчених, присвячених ефективності застосування фулеренових добавок в пластичних і рідких мастильних матеріалах, дозволяє констатувати, що не всі дослідники отримали позитивний ефект щодо зниження швидкості зношування і коефіцієнта тертя. Наприклад, в роботі [9] відзначається зниження коефіцієнта тертя на 90%, в той час як в роботі [10] робиться висновок про відсутність ефекту. Таке протиріччя, на нашу думку, пов'язане з поганою розчинністю фулеренів в базових мастильних матеріалах як мінерального, так і синтетичного походження. Наприклад, автори роботи [11] відзначають, що фулерени в моторних оливах седиментаційно нестійкі, тобто не розчиняються.

В роботі [10] показано, що ефект введення вуглецевих наночастинок в пластичні мастила істотно залежить від типу мастила. Аналогічний висновок отримано і для рідких мастильних матеріалів [12], де автори роблять висновок, що синергізм добавок, що містять фулерени, з базовим мастильним матеріалом не вивчений.

На підставі виконаного аналізу можна висунути припущення, що суперечливість даних за отриманими значеннями величин зносу і коефіцієнта тертя пов'язана з поганою розчинністю фулеренів. Це призводить до зміни концентрації фулеренів під час випробувань за рахунок седиментації і до збільшення похибки вимірювань.

У роботах [13,14] представлений аналіз досліджень розчинності фулеренів в різних оліях рослинного походження. Результати аналізу свідчать, що з метою усунення процесу седиментації фулеренів в базових мастильних матеріалах необхідно попереднє розчинення фулеренів в рослинних оліях, наприклад, ріпакової олії з великим вмістом олеїнової кислоти і потім, введення отриманої композиції в технічні оливи будь-якої групи експлуатації. Такий технологічний прийом використано авторами роботи [15], що дозволило рівномірно розподілити молекули фулеренів в об'ємі мастильного матеріалу і виключити процес седиментації. Це підвищить ефективність застосування фулеренів як протизносних, протизадирних і антифрикційних присадок.

В роботі [16] показана принципова можливість використання ріпакової олії в якості мас-

тильних матеріалів або добавок до нафтових олив різного призначення. Автори зазначають, що недоліком рослинних олій є відсутність лужності. Однак після введення лужної присадки рослинні олії володіють гарними трибологічними характеристиками.

В роботі [17] виконано дослідження впливу трибологічних характеристик базової оливи при додаванні фулеренових композицій різних концентрацій. Встановлено, що застосування фулеренових композицій ефективно для базових олив, у яких трибологічні властивості знаходяться в межах  $E_y = (3,0 \dots 5,0) \cdot 10^{14}$  Дж/м<sup>3</sup>, тобто оливи із середнім рівнем трибологічних властивостей. В такому випадку ефект від застосування фулеренових композицій становитиме 20,1 ... 22,6 % зниження об'ємної швидкості зношування. Максимальний ефект зниження коефіцієнта тертя дорівнює 71 - 86%.

При застосуванні фулеренових композицій в оливах з низьким значенням трибологічних властивостей  $E_y = 1,8 \cdot 10^{14}$  Дж/м<sup>3</sup>, наприклад, гідравлічних оливах, ефект зниження швидкості зношування становить 14,8% об'ємної швидкості зношування. Максимальний ефект зниження коефіцієнта тертя дорівнює 18%.

Застосування фулеренових композицій в базових оливах з високим рівнем трибологічних властивостей, які перевищують значення  $E_y = 3,6 \cdot 10^{14}$  Дж/м<sup>3</sup>, не приводить до зростання ефекту зниження коефіцієнта тертя. Коефіцієнт тертя залишається постійним, на рівні 71 – 86%. При цьому, збільшення концентрації фулеренової композиції ефекту не приносить.

Дана робота є продовженням статті [17] і має на меті дослідити зміну трибологічних характеристик трибосистем, де в змащувальному матеріалі використовуються фулеренові композиції при зміні конструкції трибосистем та порівняти отримані експериментальні результати з теоретичними, які отримані раніше, та наведені в роботах [18-20].

**Мета дослідження.** Метою експериментальних лабораторних випробувань є оцінка трибологічних характеристик трибосистем при зміні їх конструктивних параметрів для різних концентрацій фулеренових композицій та підтвердження адекватності розроблених математичних моделей формування зносостійкої змащувальної плівки на поверхнях тертя, які опубліковані раніше.

**Методичний підхід в проведенні досліджень.** Для проведення лабораторних випробувань з оцінки об'ємної швидкості зношування  $I$ , м<sup>3</sup>/год та коефіцієнта тертя  $f$  різних конструкцій трибосистем при застосуванні різних концентрацій фулеренових композицій, використовували наступні дві групи трибосистем.

Перша група трибосистем враховує сумісність сполучених матеріалів у рухомого і нерухомого трибоелементів. Матеріали трибоелементів

оцінювали за допомогою логарифмічного декременту загасання ультразвукових коливань  $\delta$ , які проходять через матеріал, що досліджується. Методика вимірювання та результати вимірювання  $\delta$  наведено в роботі [21]. В зазначеній роботі показано взаємозв'язок логарифмічного декременту загасання ультразвукових коливань з величиною внутрішнього тертя структури матеріалу, що досліджується. На основі даних роботи [21] сформуємо три конструкції трибосистем за кінематичною схемою «кільце-кільце».

1. Рухомий трибоелемент – сталь 40X (HRC 52), коефіцієнт, який враховує внутрішнє тертя структури матеріалу  $\delta_p = 2644$ , нерухомий – сталь 40X (HRC 52), коефіцієнт, який враховує внутрішнє тертя структури матеріалу  $\delta_n = 2644$ . Таке сполучення матеріалів в трибосистемі визначимо за допомогою комплексного безрозмірного параметру

$$\sqrt{\frac{\delta_p \cdot \delta_n}{\pi}} = 1492.$$

2. Рухомий трибоелемент – сталь 40X (HRC 52), коефіцієнт, який враховує внутрішнє тертя структури матеріалу  $\delta_p = 2644$ , нерухомий – сірий модифікований чавун СЧМ (HB 280), коефіцієнт, який враховує внутрішнє тертя структури матеріалу  $\delta_n = 3315$ . Величина комплексного безрозмірного параметру сполучених матеріалів в трибосистемі дорівнює

$$\sqrt{\frac{\delta_p \cdot \delta_n}{\pi}} = 1670.$$

3. Рухомий трибоелемент – сталь 40X (HRC 52), коефіцієнт, який враховує внутрішнє тертя структури матеріалу  $\delta_p = 2644$ , нерухомий – Бр.АЖ 9 – 4 (HB 100), коефіцієнт, який враховує внутрішнє тертя структури матеріалу  $\delta_n = 3494$ . Величина комплексного безрозмірного параметру сполучених матеріалів в трибосистемі дорівнює

$$\sqrt{\frac{\delta_p \cdot \delta_n}{\pi}} = 1715.$$

Друга група трибосистем враховує величини площ тертя у рухомого та нерухомого трибоелементів та об'єми матеріалу, які розтошовані під площами тертя. В роботі [22] такий параметр отримав назву – коефіцієнт форми трибосистеми  $K_f$ , розмірність м<sup>-1</sup>. Формули для розрахунку  $K_f$  наведено в роботі [22]. На основі даних роботи [22] сформуємо три конструкції трибосистем.

Рухомий трибоелемент сталь 40X (HRC 52); нерухомий трибоелемент Бр.АЖ 9-4 (HB 100). Площа тертя рухомого трибоелементу  $F_p = 0,0003$  м<sup>2</sup>, нерухомого  $F_n = 0,0006$  м<sup>2</sup>. Коефіцієнт форми трибосистеми дорівнює  $K_f = 1,5$  м<sup>-1</sup>.

Рухомий трибоелемент сталь 40X (HRC 52);  
нерухомий трибоелемент Бр.АЖ 9-4 (HB 100).  
Площа тертя рухомого трибоелементу  $F_p = 0,0003 \text{ м}^2$ ,  
нерухомого  $F_H = 0,00015 \text{ м}^2$ . Коефіцієнт  
форми трибосистеми дорівнює  $K_\phi = 8 \text{ м}^{-1}$ .

Рухомий трибоелемент сталь 40X (HRC 52);  
нерухомий трибоелемент Бр.АЖ 9-4 (HB 100).  
Площа тертя рухомого трибоелементу  $F_p = 0,0003 \text{ м}^2$ ,  
нерухомого  $F_H = 0,00024 \text{ м}^2$ . Коефіцієнт  
форми трибосистеми дорівнює  $K_\phi = 16 \text{ м}^{-1}$ .

Базова олива М-10Г2к, де в змащувальному  
матеріалі не міститься фулеренових добавок. До  
базової оливи вводили наступні концентрації фу-  
леренових композицій:

- 50 гр/кг = 0,5 гр/кг фулеренів + 49,5 гр/кг ро-  
слинної ріпакової олії;
- 100гр/кг = 0,75 гр/кг фулеренів + 99,25 гр/кг  
рослинної ріпакової олії;
- 150 гр/кг = 1гр/кг фулеренів + 149 гр/кг ро-  
слинної ріпакової олії.

Рослинна ріпакова олія олеїнового типу за-  
стосовувалася в якості розчинника фулеренів з  
подальшим додаванням отриманої композиції до  
моторної оливи нафтового походження. Такий ді-  
апазон зміни концентрацій фулеренових компо-  
зицій обраних на підставі експериментальних до-  
сліджень, які були проведені на чотириохкулько-  
вій машині тертя [15]. Результатом цих дослі-  
джень є висновок, що збільшення фулеренової  
композиції більше 150 гр/кг позитивного ефекту  
не дає.

При плануванні лабораторних випробувань  
трибосистем при зміні конструктивних парамет-  
рів необхідно визначити мінімальний обсяг вибі-  
рки – кількість однакових повторів під час експе-  
рименту, які необхідні для отримання достовірної  
інформації з заданою точністю (відносною похиб-  
кою  $\varepsilon$ ) і достовірністю (довірчою ймовірністю  $q$ ).  
З метою визначення шуканої величини, скориста-  
ємося основними положеннями математичної  
статистики і керівним положенням із стандартиза-  
ції РД 50-690-89.

Першою необхідною умовою такої оцінки є  
перевірка вибірки значень швидкості зношування  
 $I$  та коефіцієнта тертя  $f$  на відповідність норма-  
льному закону розподілу. Для цього розрахову-  
вали середньоквадратичне абсолютне відхи-  
лення для об'ємної швидкості зношування та ко-  
ефіцієнта тертя трибосистем, середньоквадрати-  
чне відхилення реєструємих величин під час ек-  
сперименту та виконували перевірку отриманих  
значень на однорідність і відтворюваність від до-  
сліду до дослідів за критерієм Кохрена.

Кількість  $N$  однотипних трибосистем, які да-  
ють необхідну достовірність і відтворюваність ре-  
зультатів, при заданій довірчій ймовірності  $q$  і від-  
носної похибки  $\varepsilon$  визначається за виразом:

$$\frac{t_q(N-1)}{\sqrt{N}} = \frac{\varepsilon}{v}, \quad (1)$$

де  $t_q$  – коефіцієнт Стьюдента;  $v$  – коефіцієнт ва-  
ріації, визначається як:

$$v_I = \frac{S_I}{I_{cp}}, \quad (2)$$

$$v_f = \frac{S_f}{f_{cp}}, \quad (3)$$

де  $S_I$  і  $S_f$  – середньоквадратичне відхилення для  
об'ємної швидкості зношування та коефіцієнта  
тертя;  $I_{cp}$  і  $f_{cp}$  – середнє значення об'ємної швид-  
кості зношування та коефіцієнта тертя.

Представлений методичний підхід в прове-  
денні експериментальних лабораторних випро-  
бувань дозволить обґрунтувати мінімальну кіль-  
кість однотипних трибосистем для отримання до-  
стовірної інформації про трибологічні характери-  
стики при наявності розчинів фуллеренів в мас-  
тильному матеріалі.

Отримані експериментальні значення об'єм-  
ної швидкості зношування і коефіцієнта тертя по-  
рівнювалися з теоретично отриманими значен-  
нями за математичними моделями, які наведено  
в роботах [18-20]. Відносну похибку моделю-  
вання об'ємної швидкості зношування і коефіцієн-  
та тертя в будь-якій точці процесу визначали за  
виразами:

$$e_I = \left| \frac{I_{екс} - I_M}{I_{екс}} \right| \cdot 100\% \quad (4)$$

$$e_f = \left| \frac{f_{екс} - f_M}{f_{екс}} \right| \cdot 100\%, \quad (5)$$

де  $e_I$ ,  $e_f$  – відносна похибка моделювання об'єм-  
ної швидкості зношування і коефіцієнта тертя;  
 $I_{екс}$ ,  $I_M$ ,  $f_{екс}$ ,  $f_M$  – значення об'ємної швидкості зно-  
шування і коефіцієнта тертя, які виміряні в про-  
цесі експерименту і отримані при моделюванні за  
моделями, які наведено в роботах [18-20].

Під час проведення лабораторних випробу-  
вань методом штучних баз реєстрували об'ємний  
знос рухомого та нерухомого трибоелементів та з  
урахуванням часу випробувань розраховували су-  
марну об'ємну швидкість зношування,  $\text{м}^3/\text{год}$ .

**Результати досліджень.** Результати експе-  
риментальних досліджень і теоретичні криві  
зміни об'ємної швидкості зношування та коефіцієн-  
та тертя при зміні величини комплексного па-  
раметра, який характеризує внутрішнє тертя  
структури сполучених матеріалів та концентрації  
фулеренових композицій в змащувальному мате-  
ріалі, представлені на рис.1 та рис.2.

Експериментальні дослідження показали лі-  
нійну монотонну залежність зменшення об'ємної



швидкості зношування, рис. 1, на 23,0 - 29,2%. Теоретично отримане зниження об'ємної швидкості зношування, яке наведено в роботі [19], становить 27,7 - 34,1%.

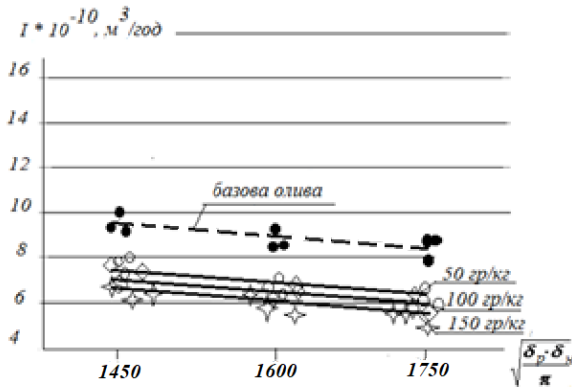


Рис. 1. Експериментальні та теоретичні залежності зміни об'ємної швидкості зношування від реологічних властивостей структури сполучених матеріалів і концентрації фулеренової композиції в базовій оливі

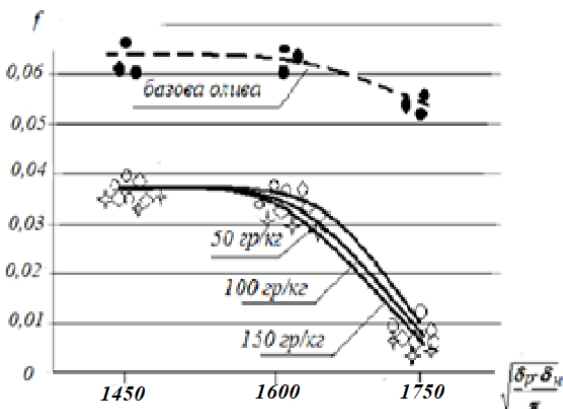


Рис. 2. Експериментальні та теоретичні залежності зміни коефіцієнта тертя трибосистеми від внутрішнього тертя структури сполучених матеріалів трибоелементів і концентрації фулеренової композиції

Залежності зміни коефіцієнта тертя мають немонотонний характер, рис. 2 і залежать від величини комплексного параметра, який характеризує сполучені матеріали. При поєднанні матеріалів в трибосистемі до величини комплексного параметру, який дорівнює 1600, коефіцієнта тертя зменшується до 32,4%. При величинах комплексного параметру, які перевищують значення 1600, ефект зниження коефіцієнта тертя збільшується до 71%.

Аналіз представлених експериментальних результатів і їх порівняння з теоретичними, які наведено в роботі [19], з розрахунком похибки моделювання, дозволяє зробити наступні висновки.

1. При поєднанні матеріалів в трибосистемах «сталь 40X + сталь 40X» і «сталь 40X + СЧМ» експериментально встановлений ефект від застосування фулеренових композицій за зниженням коефіцієнта тертя становить 32,4%, похибка моделювання 10,4%.

2. При збільшенні комплексного параметра - внутрішнього тертя сполучених матеріалів, наприклад, «сталь 40X + Бр.АЖ 9-4», ефект зниження коефіцієнта тертя збільшується до 71%, похибка моделювання 12%.

Величина зниження об'ємної швидкості зношування при зміні сполучених матеріалів в трибосистемі залишається стабільною і дорівнює зменшенню до 23,0 - 29,2%.

Великої різниці впливу концентрації фулеренової композиції в базовій оливі на ефект зниження об'ємної швидкості зношування та коефіцієнта тертя не встановлено, різниця становить 9%.

Ґрунтуючись на проведених дослідженнях можна стверджувати, що застосування фулеренових композицій в мастильних матеріалах ефективно на тих конструкціях трибосистем, де сполучення матеріалів в трибосистемах має велике значення комплексного параметра  $\sqrt{(\delta_p \cdot \delta_n) / \pi}$ , який характеризує величини внутрішнього тертя (сумісність матеріалів), що підтверджує теоретично отримані висновки, які представлені в роботі [19].

Експериментальними дослідженнями підтверджено, що збільшення концентрації фулеренової композиції в базовій оливі від 50 гр/кг до 150 гр/кг дозволяє знизити об'ємну швидкість зношування на 7,8% (теоретичний результат 6,4%), коефіцієнт тертя на 9%. Тому напрямок зниження об'ємної швидкості зношування за рахунок збільшення концентрації фулеренової композиції більш 100 гр/кг можна визнати малоефективним і експериментально підтвердженням.

Раціональною концентрацією може виступати теоретично обґрунтована і експериментально підтверджена середня величина: 0,75 гр/кг фулеренів + 99,25 гр/кг рослинної високоолеїнової олії, в якості розчинника, з подальшим додаванням в базову оливу.

Результати експериментальних досліджень і теоретичні криві зміни об'ємної швидкості зношування і коефіцієнта тертя при зміні геометричних розмірів трибосистеми - коефіцієнта форми  $K_f$ , та концентрації фулеренових композицій представлені на рис.3 і рис.4.

Пунктирна лінія відображає характер зміни об'ємної швидкості зношування і коефіцієнта тертя без застосування фулеренової композиції в базовій оливі М-10Г2к, а експериментальні точки і суцільні теоретичні лінії при наявності фулеренової композиції в різних концентраціях. На підставі отриманих експериментальних результатів,

рис.3, можна зробити висновок, що збільшення площі тертя (збільшення коефіцієнта форми трибосистеми), при одночасному введенні фулеренових композицій, сприяє зниженню швидкості зношування на 22,8 - 28,7%.

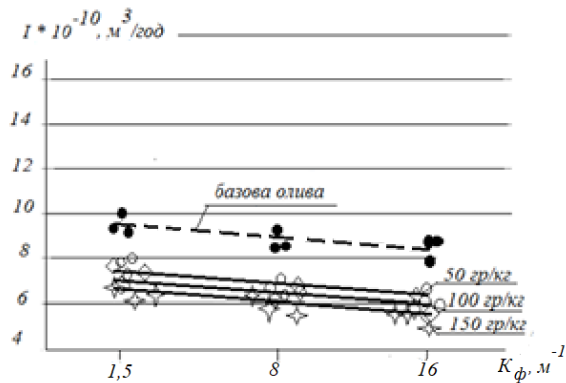


Рис.3. Експериментальні та теоретичні залежності зміни об'ємної швидкості зношування трибосистем від коефіцієнта форми і концентрації фулеренової композиції

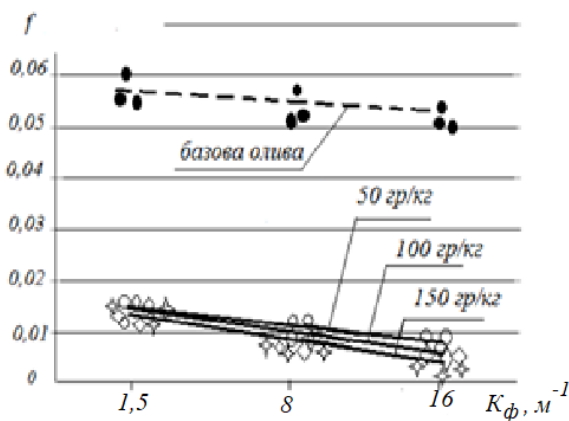


Рис.4. Експериментальні та теоретичні залежності зміни коефіцієнта тертя трибосистем від коефіцієнта форми і концентрації фулеренової композиції

Зниження коефіцієнта тертя, рис. 4, становить 64,2 - 72,4%. При цьому експериментально підтверджено, що для різних концентрацій фулеренової композиції ефект зниження змінюється на 14,5%, що підтверджує теоретичні висновки, які зроблено в роботі [19]. Експериментальним шляхом підтверджено теоретичний висновок, який наведено в роботі [19], що при збільшенні площі тертя (коефіцієнта форми трибосистеми), коливальний процес зменшується і при  $K_f = 16 m^{-1}$  повністю зникає.

**Висновки.** Результати експериментальних досліджень і теоретичні криві зміни об'ємної

швидкості зношування при зміні величини комплексного параметра, який характеризує внутрішню структуру сполучених матеріалів та концентрації фулеренових композицій в змащувальному матеріалі показали лінійну монотонну залежність зменшення об'ємної швидкості зношування на 23,0 - 29,2%. Теоретично отримане зниження об'ємної швидкості зношування, яке наведено в роботі [19], становить 27,7 - 34,1%.

Встановлено, що залежності зміни коефіцієнта тертя мають немонотонний характер і залежать від величини комплексного параметра. При поєднанні матеріалів в трибосистемі до величини комплексного параметра, який дорівнює 1600, коефіцієнта тертя зменшується до 32,4%. При величинах комплексного параметра, які перевищують значення 1600, ефект зниження коефіцієнта тертя збільшується до 71%. Тому застосування фулеренових композицій дасть найбільший ефект для трибосистем, де сполучені матеріали перевищують значення комплексного параметра 1600. Даний висновок розкриває практичне значення роботи.

Результати експериментальних досліджень і теоретичні криві зміни об'ємної швидкості зношування і коефіцієнта тертя при зміні геометричних розмірів трибосистеми - коефіцієнта форми  $K_f$  та концентрації фулеренових композицій, показали, що збільшення площі тертя (збільшення коефіцієнта форми трибосистеми), при одночасному введенні фулеренових композицій, сприяє зниженню швидкості зношування на 22,8 - 28,7%.

Експериментальними дослідженнями підтверджено, що збільшення концентрації фулеренової композиції в базовій оливі від 50 гр/кг до 150 гр/кг дозволяє знизити об'ємну швидкість зношування на 7,8%, коефіцієнт тертя на 9%. Тому напрямок зниження об'ємної швидкості зношування за рахунок збільшення концентрації фулеренової композиції більш 100 гр/кг можна визнати малоефективним і експериментально підтвердженим.

Раціональною концентрацією при зміні конструктивних параметрів трибосистем може виступати теоретично обґрунтована і експериментально підтверджена середня величина: 0,75 гр/кг фулеренів + 99,25 гр/кг рослинної високоолеїнової олії, в якості розчинника, з подальшим додаванням в базову оливу. Використання даного висновку дозволить раціонально застосовувати фулеренові композиції для розробки новітніх змащувальних матеріалів.

## Література

1. Яхьяев Н.Я., Бегов Ж.Б., Батырмурзаев Ш.Д. 2009. Новая смазочная композиция для модификаций поверхностей трибосопряжений судового малоразмерного дизеля / Вестник АГТУ. Сер.: Морская техника и технология. №1, с. 251-255.

2. Елецкий А.В., Смирнов Б.М. 1993. Фуллерены // *Успехи физ. наук*, 163 (2), 33–60 DOI:10.3367/UFNr.0163.199302b.0033

3. Гинзбург Б.М., Байдакова М.В., Киреевко О.В. и др. 2000. Влияние фуллерена C<sub>60</sub>, фуллереновых саж и других углеродных материалов на граничное трение скольжения металлов / *Журнал технической физики*, т.70, вып.12, с.87-97.

4. Гинзбург Б.М., Киреевко О.Ф., Точильников Д.Г., Булатов В.П. 1995. Образование износостойкой структуры при трении скольжения стали по меди в присутствии фуллерена или фуллереновой сажи // *Письма в ЖТФ*. Т. 23. Вып. 23. С. 38–42.

5. Гинзбург Б.М., Киреевко О.Ф., Байдакова М.В., Соловьев В.А. 1999. Образование защитной пленки на поверхности трения меди в присутствии фуллерена C<sub>60</sub> // *Письма в ЖТФ*. Вып. 11. С. 113–116.

6. Гинзбург Б.М., Точильников Д.Г., Киреевко О.Ф., Булатов В.П. 1995. Влияние фуллерена C<sub>60</sub> на характеристики трения и изнашивания стали // *Письма в ЖТФ*. Вып. 22. С. 62–66

7. Гвоздев А. А., Смирнова А. И., Березина Е. В., Дунаев А. В., Ткачев А. Г., Усольцева Н. В. 2018. Исследование триботехнических характеристик перспективных смазочных материалов с углеродными наночастицами / *Жидк. крист. и их практич. использ.* / *Liq. Cryst. and their Appl.*, 18 (1), с. 66–72. DOI: 10.18083/LCAppl.2018.1.66

8. Imran Ali, Al Arsh Basheer, Anastasia Kucherova et al. 2019. Advances in carbon nanomaterials as lubricants modifiers / *Journal of Molecular Liquids*. V. 279, p. 251-266. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.01.113>

9. Xiaowei Li, Xiaowei Xu, Yong Zhou, et al. 2019. Insights into friction dependence of carbon nanoparticles as oil-based lubricant additive at amorphous carbon interface / *Carbon*. V. 150, p. 465-474 <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2019.05.050>

10. Mungse H.P., Khatri O.P. 2014. Chemically Functionalized Reduced Graphene Oxide as Novel Material for Reduction of Friction and Wear / *Phys. Chem. C*, 118 (26), p. 14394–14402. DOI: 10.1021/jp5033614.

11. Дунаев А. В., Филиппова Е. М. 2017. Нетрадиционная триботехника для повышения ресурса автотракторной техники: Итоги 25-летнего развития. - М.: ГОСНИТИ, 256 с.

12. Yunusov F. A., Breki A. D., Vasilyeva E. S., et al. 2020. The influence of nano additives on tribological properties of lubricant oil / *Materials today: proceedings*. Available online 14 February <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.447>

13. Семенов К.Н., Чарыков Н.А., Арапов О.В. и др. 2009. Растворимость легких фуллеренов в масле гвоздики / *Вестник Санкт-Петербургского университета*. сер.4, вып.1, с. 145–149.

14. Семенов К.Н., Чарыков Н.А., Арапов О.В. и др. 2010. Растворимость легких фуллеренов в некоторых эфирных и растительных маслах / *Химия растительного сырья*. №2. С. 147–152.

15. Vojtov V.A., Kravcov A.G., and Tsymbal B.M. 2020. Evaluation of Tribotechnical Characteristics of Tribosystems in the Presence of Fullerenes in the Lubricant / *FRICITION AND WEAR*, Vol. 41, No. 6, pp. 521- 525. DOI: 10.3103/S1068366620060197

16. Войтов В.А., Сысенко И.И. 2013. Физическое моделирование скорости изнашивания и ресурса трибосистем двухтактного двигателя бензопилы при использовании растительных масел / *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П. Василенка*. – Харків: ХНТУСГ, Вип. 136: Системотехніка і технології лісового комплексу. Транспортні технології. – С. 257 – 264.

17. Войтов В. А., Кравцов А. Г. 2021. Експериментальні дослідження трибосистем при наявності фулеренів в мастильному матеріалі. Частина 1. За параметром трибологічних характеристик базової оливи // *Проблеми тертя та зношування*. №. 2 (91). – С. 27-36.

18. Кравцов А.Г. 2017. Разработка математической модели взаимодействия электрически активных гетерогенных мелкодисперсных систем на границе раздела поверхность трения – смазочная среда // *Проблеми трибології*. № 3. – С. 89 – 99.

19. Кравцов А.Г. 2018. Моделирование формирования масляной пленки на поверхности трения при наличии фуллереновых добавок в смазочном материале и ее влияние на скорость изнашивания трибосистем // *Проблеми трибології*. № 1. С. 69 – 77.

20. Кравцов А.Г. 2018. Розробка макрореологічної моделі релаксації напружень в мастильній плівці на поверхні тертя при наявності фулеренів // *Проблеми трибології*. № 4. С. 36 – 40.

21. Захарченко М.Б. 2015. Методика оценки реологических свойств структуры сопряженных материалов в трибосистеме // *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П. Василенка*. – Харків: ХНТУСГ, Вип. 158: Ресурсозберігаючі технології, матеріали та обладнання у ремонтному виробництві. С. 64-69.

22. Войтов В.А., Яхно О.М., Аби Сааб Ф.Х. 1999. Принципы конструктивной износостойкости узлов трения гидромашин. – К.: Нац. техн. ун-т «Киев. политехн. ин-т», 190 с.

## References

1. Yakh'yayev N.YA., Begov ZH.B., Bатырмурзайев SH.D. 2009. Novaya smazoch'naya kompozitsiya dlya modifikatsiy poverkhnostey tribosopryazheniy sudovogo malorazmernogo dizelya / *Vestnik AGTU. Ser.: Morskaya tekhnika i tekhnologiya*. №1, pp. 251-255.

2. Yeletskiy A.V., Smirnov B.M. 1993. Fullereny // *Uspekhi fiz. nauk*, 163 (2), pp. 33–60. DOI:10.3367/UFNr.0163.199302b.0033

3. Ginzburg B.M., Baydakova M.V., Kireyenko O.V. i dr. 2000. Vliyaniye fullerena C<sub>60</sub>, fullerennykh sazh i drugikh uglerodnykh materialov



na granichnoye treniye skol'zheniya metallov / Zhurnal tekhnicheskoy fiziki, t.70, vyp.12, pp.87-97.

4. Ginzburg B.M., Kireyenko O.F., Tochil'nikov D.G., Bulatov V.P. 1995. Obrazovaniye iznosostoykoy struktury pri trenii skol'zheniya stali po medi v prisutstvii fullerena ili fullerenovoy sazi // Pis'ma v ZHTF. T. 23. Vyp. 23. pp. 38–42.

5. Ginzburg B.M., Kireyenko O.F., Baydako-va M.V., Solov'yev V.A. 1999. Obrazovaniye zashchitnoy plenki na poverkhnosti treniya medi v prisutstvii fullerena C60 // Pis'ma v ZHTF. Vyp. 11. pp. 113–116.

6. Ginzburg B.M., Tochil'nikov D.G., Kireyenko O.F., Bulatov V.P. 1995. Vliyaniye fullerena C60 na kharakteristiki treniya i iznashivaniya stali // Pis'ma v ZHTF. Vyp. 22. pp. 62–66

7. Gvozdev A.A., Smirnova A.I., Berezi-na Ye.V., Dunayev A.V., Tkachev A.G., Usolt'seva N.V. 2018. Issledovaniye tribotekhnicheskikh kharakteristik perspektivnykh smazochnykh materialov s uglerodnymi nanochastitsami / Zhidk. krist. i ikh praktich. ispol'z. / Liq. Cryst. and their Appl., 18 (1), pp. 66–72. DOI: 10.18083/LCAppl.2018.1.66

8. Imran Ali, Al Arsh Basheer, Anastasia Kucherova et al. 2019. Advances in carbon nanomaterials as lubricants modifiers / Journal of Molecular Liquids. V. 279, p. 251-266. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.01.113>

9. Xiaowei Li, Xiaowei Xu, Yong Zhou, et al. 2019. Insights into friction dependence of carbon nanoparticles as oil-based lubricant additive at amorphous carbon interface / Carbon. V. 150, p. 465-474 <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2019.05.050>

10. Mungse H.P., Khatri O.P. 2014. Chemically Functionalized Reduced Graphene Oxide as Novel Material for Reduction of Friction and Wear / Phys. Chem. C, 118 (26), p. 14394–14402. DOI: 10.1021/jp5033614.

11. Dunayev A. V., Filippova Ye. M. 2017. Netraditsionnaya tribotekhnika dlya povysheniya resursa avtotraktornoy tekhniki: Itogi 25-letnego razvitiya. - M.: GOSNITI, 256 p.

12. Yunusov F. A., Breki A. D., Vasilyeva E. S., et al. 2020. The influence of nano additives on tribological properties of lubricant oil / Materials today: proceedings. Available online 14 February <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.447>

13. Semenov K.N., Charykov N.A., Arapov O.V. i dr. 2009. Rastvorimost' legkikh fullerenov v masle gvozdiki / Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. ser.4, vyp.1, pp. 145–149.

14. Semenov K.N., Charykov N.A., Arapov O.V. i dr. 2010. Rastvorimost' legkikh fullerenov v nekotorykh efirnykh i rastitel'nykh maslakh / Khimiya rastitel'nogo syr'ya. №2. pp. 147–152.

15. Vojtov V. A., Kravcov A. G., and Tsymbal B. M. 2020. Evaluation of Tribotechnical Characteristics of Tribosystems in the Presence of Fullerenes in the Lubricant / FRICTION AND WEAR, Vol. 41, No. 6, pp. 521- 525. DOI: 10.3103/S1068366620060197

16. Vojtov V.A., Sysenko Y.Y. 2013. Fyzycheskoe modelyrovanye skorosty yznashyvaniya y resursa trybosystem dvukhtaktnoho dvyhatelya benzopyly pry yspol'zovanyy rastytel'nykh masel / Visnyk Kharkivs'koho natsional'noho tekhnichnoho universytetu sil's'koho hospodarstva im. P. Vasylenka. Kharkiv: KHNTUS-H, Vyp. 136: Systemotekhnika i tekhnolohiyi lisovoho kompleksu. Transportni tekhnolohiyi. pp. 257 – 264.

17. Vojtov V. A., Kravtsov A. H. 2021. Eksperymental'ni doslidzhennya trybosystem pry nayavnosti fulereniv v mastyl'nomu materiali. Chastyna 1. Za parametrom trybolohichnykh kharakterystyk bazovoyi olyvy // Problemy tertya ta znoshuvannya. № 2 (91). pp. 27-36.

18. Kravtsov A.G. 2017. Razrabotka matematicheskoy modeli vzaimodeystviya elektricheskoy aktivnykh geterogennykh melkodispersnykh sistem na granitse razdela poverkhnost' treniya – smazochnaya sreda // Problemi tribologii. № 3. pp. 89– 99.

19. Kravtsov A.G. 2018. Modelirovaniye formirovaniya maslyanoy plenki na poverkhnosti treniya pri nalichii fullerenovykh dobavok v smazochnom materiale i yeye vliyaniye na skorost' iznashivaniya tribosistem // Problemi tribologii. № 1. pp. 69– 77.

20. Kravtsov A.H. 2018. Rozrobka makroreolohichnoyi modeli relaksatsiyi napruzhen' v mastyl'niy plivtsi na poverkhni tertya pry nayavnosti fulereniv // Problemi tribologii. № 4. pp. 36 – 40.

21. Zakharchenko M.B. 2015. Metodyka otsenky reolohycheskykh svoystv struktury sopryazhennykh materialov v trybosysteme // Visnyk Kharkivs'koho natsional'noho tekhnichnoho universytetu sil's'koho hospodarstva im. P. Vasylenka. – Kharkiv: KHNTUSH, Vyp. 158: Resursoberihayuchi tekhnolohiyi, materialy ta obladnannya u remontnomu vyrobnyts'tvi. pp. 64-69.

22. Vojtov V.A., Yakhno O.M., Abi Saab F.KH. 1999. Printsipy konstruktivnoy iznosostoykosti uzlov treniya gidromashin. – K.: Nats. tekhn. un-t «Kiev. politekhn. in-t», 190 p.

## Аннотация

### Экспериментальные исследования трибосистем при наличии фуллеренов в смазочном материале. Часть 3. При изменении конструктивных параметров трибосистем

А.Г.Кравцов

В работе представлены результаты экспериментальных исследований и теоретические кривые изменения объемной скорости изнашивания и коэффициента трения при изменении конструкции трибосистем и концентрации фуллереновых композиций в смазочном материале. Конструкцию трибосистем



оценивали двумя параметрами: величиной комплексного параметра, который характеризует внутреннее трение структуры совместимых материалов и величине площадей трения и объемов материала, которые размещены под площадями трения. Такой параметр учитывается коэффициентом формы трибосистемы.

Экспериментальным путем показана линейная монотонная зависимость уменьшения объемной скорости изнашивания на 23,0 - 29,2% при применении фуллереновых композиций различных концентраций. Установлено, что зависимости изменения коэффициента трения имеют немонотонный характер и зависят от величины комплексного параметра. При сочетании материалов в трибосистеме до величины комплексного параметра, равного 1600, коэффициент трения уменьшается до 32,4%. При величинах комплексного параметра, которые превышают значение 1600, эффект снижения коэффициента трения увеличивается до 71%. Сделан вывод, что применение фуллереновых композиций даст наибольший эффект для трибосистем, где совместимые материалы превышают значения комплексного параметра 1600. Данный вывод показывает направление рационального использования смазочных материалов содержащих фуллереновые композиции.

Результаты экспериментальных исследований и теоретические кривые изменения объемной скорости изнашивания и коэффициента трения при изменении геометрических размеров трибосистемы - коэффициента формы и концентрации фуллереновых композиций, показали, что увеличение площади трения, при одновременном введении фуллереновых композиций, способствует снижению скорости изнашивания на 22,8 - 28,7%.

Доказано, что рациональной концентрацией при изменении конструктивных параметров трибосистем может выступать теоретически обоснованная и экспериментально подтвержденная средняя величина 0,75 гр/кг фуллеренов + 99,25 гр/кг растительного рапсового высокоолеинового масла, в качестве растворителя, с последующим добавлением в базовое масло. Использование данного вывода позволит рационально использовать фуллереновые композиции для разработки новых смазочных материалов.

**Ключевые слова:** фуллерены; фуллереновые композиции; смазочные материалы; растительные масла; конструкция трибосистемы; внутреннее трение структуры материалов; коэффициент формы трибосистемы; объемная скорость изнашивания; коэффициент трения/

#### Abstract

### Experimental studies of tribosystems in the presence of fullerenes in a lubricant. Part 3. When changing the design parameters of tribosystems

A.G. Kravtsov

The paper presents the results of experimental studies and theoretical curves of changes in the volumetric wear rate and coefficient of friction when changing the design of tribosystems and the concentration of fullerene compositions in the lubricant. The design of tribosystems was assessed by two parameters: the value of the complex parameter, which characterizes the internal friction of the structure of compatible materials and the value of the friction areas and volumes of the material, which are located under the friction areas. This parameter is taken into account by the form factor of the tribosystem.

Experimentally, a linear monotonic dependence of the decrease in the volumetric wear rate by 23,0 – 29,2% is shown when using fullerene compositions of various concentrations. It was found that the dependences of the change in the coefficient of friction have a non-monotonic character and depend on the value of the complex parameter. When materials are combined in the tribosystem up to the value of the complex parameter equal to 1600, the friction coefficient decreases to 32,4%. When the values of the complex parameter exceed the value of 1600, the effect of reducing the coefficient of friction increases to 71%. It is concluded that the use of fullerene compositions will give the greatest effect for tribosystems, where compatible materials exceed the values of the complex parameter 1600. This conclusion shows the direction of the rational use of lubricants containing fullerene compositions.

The results of experimental studies and theoretical curves of the change in the volumetric wear rate and the friction coefficient with a change in the geometric dimensions of the tribosystem - the shape factor and the concentration of fullerene compositions, showed that an increase in the friction area, with the simultaneous introduction of fullerene compositions, contributes to a decrease in the wear rate by 22,8 - 28,7%.

It has been proved that a theoretically substantiated and experimentally confirmed average value of 0,75 g/kg of fullerenes + 99,25 g/kg of vegetable rapeseed high oleic oil as a solvent, with subsequent addition to the base oil, can act as a rational concentration when the design parameters of tribosystems change. The use of this conclusion will make it possible to rationally use fullerene compositions for the development of new lubricants.

**Keywords:** fullerenes; fullerene compositions; lubricants; vegetable oils; tribosystem design; internal friction of the structure of materials; form factor of the tribosystem; volumetric wear rate; coefficient of friction

#### Бібліографічне посилання/ Bibliography citation: Harvard

Kravtsov, A. G. (2021). 'Experimental studies of tribosystems in the presence of fullerenes in a lubricant. Part 3. When changing the design parameters of tribosystems', *Engineering of nature management*, (3(21)), pp. 12 - 20.

Подано до редакції / Received: 15.06.2021