

УДК 621.891

DOI: 10.18372/0370-2197.2(91).15527

В. А. ВОЙТОВ, А. Г. КРАВЦОВ

Харківський національний технічний університет сільського господарства  
ім. Петра Василенка, Україна

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИБОСИСТЕМ ПРИ НАЯВНОСТІ ФУЛЕРЕНІВ В МАСТИЛЬНОМУ МАТЕРІАЛІ. ЧАСТИНА 1. ЗА ПАРАМЕТРОМ ТРИБОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК БАЗОВОЇ ОЛИВИ

*Представлені результати експериментальних досліджень метою яких є підтвердження адекватності розроблених математичних моделей формування зносостійкої змащувальної плівки на поверхнях тертя при наявності фулеренових композицій за різними базовими оливами. З аналізу представлених експериментальних значень і їх порівняння з теоретичними залежностями слідує, що математична модель формування мастильної плівки на поверхні тертя трибоелементів, яка розроблена в попередніх роботах авторів, адекватно відображає процес тертя та зношування і знаходиться в функціональному взаємозв'язку зі швидкістю зношування та коефіцієнтом тертя. Експериментальні дослідження дозволили підтвердити теоретично отриманий в попередніх роботах результат, що застосування фулеренової композиції, що складається з розчинника-рослинної олії і дрібнодисперсного порошку фулеренів, знижує швидкість зношування при зміні трибологічних властивостей базових олив на 20,1 ... 22,6%. Похибка моделювання становить 6,5 ... 9,2%. На основі експериментальних досліджень зроблено висновок, що введення фулеренової композиції в базові оливи з низькими значеннями трибологічних властивостей зменшує коефіцієнт тертя на 18%. Максимальний ефект зниження коефіцієнта тертя, що дорівнює 71 - 86%, характерний для базових олив з середніми значеннями трибологічних властивостей. 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 та коефіцієнт тертя між даними концентраціями на 7,8% (теоретичний результат 6,4%). Тому напрямок зниження об'ємної швидкості зношування та коефіцієнта тертя за рахунок збільшення концентрації фулеренової композиції більш 100 гр/кг можна визнати малоєфективним і експериментально підтвердженим.*

**Ключові слова:** мастильна плівка, трибологічні властивості базових олив, об'ємна швидкість зношування, коефіцієнт тертя, фулерени, трибосистема, адекватність математичної моделі, похибка моделювання

**Вступ.** Одним з перспективних напрямків підвищення трибологічних характеристик сучасних мастильних матеріалів, як рідких так і пластичних, є використання нанодобавок. Широке застосування в якості нанодобавок знайшли фулерени. Введення фулеренів у вигляді нанопорошків в мастильний матеріал сприяє створенню всередині мастильного матеріалу дрібнодисперсних структур у вигляді кластерів і міцел. Особливо активно йде процес міцелоутворення, коли застосовується попереднє диспергування молекул фулерену в розчинниках, наприклад, рослинних оліях, а потім введення отриманого розчину фулеренів в базовий мастильний матеріал. При такому способі отримання фулеренових композицій спостерігається максимальний ефект підвищення трибологічних характеристик мастильних матеріалів, що і приведено в роботі [1].

**Аналіз останніх публікацій по даній проблемі.** Авторами роботи [2] представлений огляд літератури по мастильним матеріалам з додаванням наночастинок. Проаналізовано вплив наночастинок на триботехнічні характеристики олив. У роботі відзначено, що використання нанодобавок до мастильних матеріалів призводить до підвищення в'язкості базового середовища, високої несучої здатності сполучення, зниження коефіцієнта тертя, підвищення зносостійкості.

Робота [3] містить висновки, що трибологічні характеристики мастильного матеріалу можна поліпшити застосуванням наноприправок. Додавання наночастинок до звичайних базових олив є перспективним напрямком. Робота присвячена інформаційному огляду застосування нанодобавок до рідких мастильних матеріалів і перспективам його використання при виробництві технічних олив. Аналогічні висновки про перспективність застосування наноматеріалів в рідких мастильних матеріалах робиться авторами роботи [4].

Роботи [5-7] присвячені фулеренам, як добавкам до мастильних матеріалів. Автори відзначають, що використання фулеренів знижує коефіцієнт тертя і підвищує зносостійкість трибосполучень. В роботі [7] зазначається, що концентрація фулеренової добавки повинна бути в межах 0,5 ... 2,0% мас. В роботі [8] наведено результат застосування фулерена C<sub>60</sub>. Автори відзначають позитивний ефект, та роблять висновок що зниження коефіцієнта тертя при добавці фулеренів в оливи може досягати 90% в порівнянні з базовою оливою.

У статті [9] виконані теоретичні дослідження формування мастильної плівки на поверхні тертя при наявності розчинів фулеренів в змащувальному матеріалі. Математична модель розроблена на основі взаємодії електрично - активних гетерогенних дрібнодисперсних систем на межі розділу поверхня тертя - мастильне середовище та описується диференціальним рівнянням Пуассона. Показано зв'язок електростатичного поля поверхні тертя і електричного поля в об'ємі рідини. Теоретичним шляхом встановлено, що застосування «розчинників» фулеренів, в якості яких можуть виступати високоолеїнові рослинні олії, можна «запустити» процес міцелотворення, де ядром міцели є молекула фулерену, оточена молекулами, наприклад, олеїнової кислоти. Як показали теоретичні дослідження кількість міцел в 50 разів перевищує кількість кластерів в базовому мастильному середовищі при однаковій концентрації фулеренів, а дипольний момент міцел на порядок вище, ніж дипольний момент кластерів. При цьому, більш ефективні міцели, де в якості ядра виступає одинична молекула фулерену, а не кластер з молекул фулеренів, що впливає на розмір міцел, що утворилися.

За результатами моделювання [10] встановлено, що величина напруженості електростатичного поля поверхні тертя є більш значущим фактором при формуванні товщини мастильної плівки на поверхні тертя, ніж величина електричного поля мастильного матеріалу. Встановлено раціональні концентрації фулеренів і рослинної олії, як добавки в базові мастильні матеріали, які становлять 100 гр/кг. Показано, що застосування таких концентрацій дозволить знизити об'ємну швидкість зношування трибосистем на 27,7% - 34,1%, при цьому, найбільш сильний ефект проявляється в базових оливах з середніми значеннями трибологічних властивостей.

Викладений вище висновок вимагає експериментального підтвердження та сприймається нами як робоча гіпотеза зниження швидкості зношування та коефіцієнта тертя в трибосистемах при наявності в мастильному матеріалі фулеренових композицій.

**Мета дослідження.** Метою експериментальних лабораторних випробувань є підтвердження адекватності розроблених математичних моделей формування зносостійкої змащувальної плівки на поверхнях тертя при наявності фулеренових композицій за різними базовими оливами.

**Методичний підхід в проведенні досліджень.** При розробці загального методичного підходу в проведенні досліджень використовувалися основні положення системного підходу і вимоги міждержавного стандарту ДСТУ 30480-97 «Забезпечення зносостійкості виробів. Методи дослідження на зносостійкість. Загальні вимоги», який набрав чинності Держстандартом України з 01.07.99.

Згідно основних положень системного підходу аналіз процесів тертя та зношування в умовах граничного змащення слід розглядати у взаємодії вхідних і вихідних параметрів на трибосистему, де трибосистема розглядається як складна система.

Структурна схема оцінки похибки моделювання, результати якого наведено в роботах [9,10] за результатами лабораторних експериментальних досліджень трибосистем, представлено на рис.1.

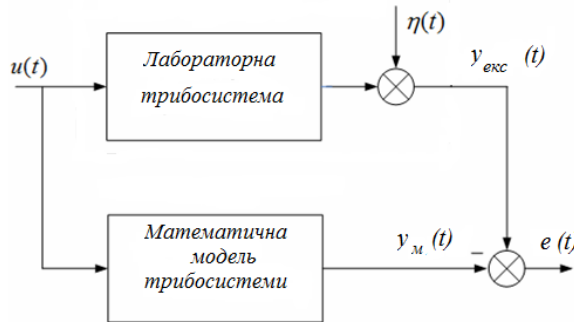


Рис. 1. Структурна схема оцінки похибки моделювання за результатами лабораторних експериментальних досліджень:  $u(t)$  – вхідний вплив на трибосистему;  $\eta(t)$  – неконтрольований випадковий вплив;  $y_{екс}(t)$  – вихідний сигнал (результати експерименту);  $y_м(t)$  – вихідний сигнал (результати моделювання);  $e(t)$  – різниця (похибка) між результатами експерименту і моделювання

При оцінці точності моделювання, тобто адекватності моделі експериментальним даним, на вхід системи подавався вхідний сигнал  $u(t)$ , який враховував конструкцію трибосистеми, трибологічні властивості мастильного середовища, матеріали з яких виготовлені трибоелементи та їх реологічні властивості, а також навантаження і швидкість ковзання. Отримані експериментальні результати у вигляді вихідного сигналу  $y_{екс}(t)$ , порівнювалися з результатами моделювання  $y_м(t)$ .

За результатами порівняння розраховувалася різниця (похибка) моделювання:

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{екс}(t) - y_м(t))^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e^2(t), \quad (1)$$

де  $n$  – кількість експериментів (повторів);  $e(t)$  – похибка моделювання.

Середньоквадратичне відхилення похибки моделювання в будь-якій точці процесу представимо формулою:

$$e = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e^2} \quad (2)$$

Відносну похибку моделювання об'ємної швидкості зношування і коефіцієнта тертя в будь-якій точці процесу визначимо за виразами:

$$e_I = \left| \frac{I_{екс} - I_M}{I_{екс}} \right| \cdot 100\% \quad (3)$$

$$e_f = \left| \frac{f_{екс} - f_M}{f_{екс}} \right| \cdot 100\% \quad (4)$$

де  $e_I$ ,  $e_f$  – відносна похибка моделювання об'ємної швидкості зношування і коефіцієнта тертя;  $I_{екс}$ ,  $I_M$ ,  $f_{екс}$ ,  $f_M$  – значення об'ємної швидкості зношування і коефіцієнта тертя, які виміряні в процесі експерименту і отримані при моделюванні за моделями, які наведено в роботах [9, 10].

Планування випробувань на підтвердження адекватності розроблених математичних моделей передбачає визначення необхідного обсягу випробувань для обчислення оцінок трибологічних характеристик з заданою точністю (відносною похибкою  $\varepsilon$ ) і достовірністю (довірчою ймовірністю  $q$ ).

Першою необхідною умовою такої оцінки є перевірка вибірки значень швидкості зношування  $I$  та коефіцієнта тертя  $f$  на відповідність нормальному закону розподілу.

Отриману експериментальну вибірку значень  $I$  і  $f$  необхідно перевірити на однорідність і відтворюваність від досліду до досліду за критерієм Кохрена:

$$G_p = \frac{S_{\max}^2}{\sum_{i=1}^N S_i^2} \quad (5)$$

де  $S_{\max}^2$  – максимальне значення дисперсії для  $I$  і  $f$  відповідно;  $S_i^2$  – значення дисперсії  $i$ -го досліду для  $I$  і  $f$  відповідно.

Перевіряється гіпотеза:

$$G_p < G_{табл}, \quad (6)$$

де  $G_{табл}$  – табличне значення критерію Кохрена, при заданій довірчій ймовірності  $q = 0,95$ .

Під час проведення лабораторних випробувань методом штучних баз реєстрували об'ємний знос рухомого та нерухомого трибоелементів та з урахуванням часу випробувань розраховували сумарну об'ємну швидкість зношування, м<sup>3</sup>/год.

**Результати досліджень.** Експерименталі дослідження зміни об'ємної швидкості зношування  $I$ , м<sup>3</sup>/год та коефіцієнта тертя  $f$  проводили на трибосистемі «сталь 40X + Бр.АЖ 9-4», при зміні трибологічних властивостей базових олив та концентрації фулеренової композиції. Робочі параметри процесу: навантаження на трибосистему  $N=1000$  Н; швидкість ковзання  $v=0,5$  м/с; коефіцієнт взаємного перекриття  $K_{вз}=0,5$ ; коефіцієнт форми трибосистеми  $K_{\phi}=8,1$  м<sup>-1</sup>.

В якості мастильного середовища, яке враховувалася трибологічними властивостями олив –  $E_y$ , застосовувалося:

- гідравлична олива МГП – 10 ( $E_y=1,8 \cdot 10^{14}$  Дж/м<sup>3</sup>);
- моторна олива М – 10Г<sub>2к</sub> ( $E_y=3,6 \cdot 10^{14}$  Дж/м<sup>3</sup>);
- трансмісійна олива VALVOLINE GL-5, ( $E_y=7,2 \cdot 10^{14}$  Дж/м<sup>3</sup>).

Величини значень трибологічних властивостей різних технічних олів  $E_y$ , були визначені за методикою роботи [11] та наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Трибологічні властивості різних технічних олів

Назва олів	Класифікація API	$D_u$ , мм	$P_k$ , Н	$P_3$ , Н	$I_3$ , Н	$E_y \cdot 10^{14}$ , Дж/м <sup>3</sup>
МГП-10		0,55	710	1960	24	1,8
ИГП-30		0,5	980	2450	28	2,4
М-10Г <sub>2к</sub>	CC	0,45	1235	3087	32	3,6
М-10ДМ	CD	0,35	1568	3087	49	6,2
ТАД-17и	GL-5	0,36	1568	6174	89	6,3
VALVOLINE	GL-5	0,34	1568	6174	90	7,2

В таблиці 1 прийняті наступні показники, значення яких регламентується за ГОСТ 9490 та визначається на чотирьохкульковій машині тертя:

$D_u$  – показник зносу, мм;

$P_k$  – критичне навантаження, Н;

$P_3$  – навантаження зварювання, Н;

$I_3$  – індекс зварювання.

Результати експериментальних досліджень (точки на полі графіка) та результати моделювання (суцільні лінії) при зміні трибологічних властивостей базової оливи  $E_y = (1,8 - 7,2) \cdot 10^{14}$  Дж/м<sup>3</sup>, та концентрації фулеренової композиції, наведено на рис. 2 та рис. 3.

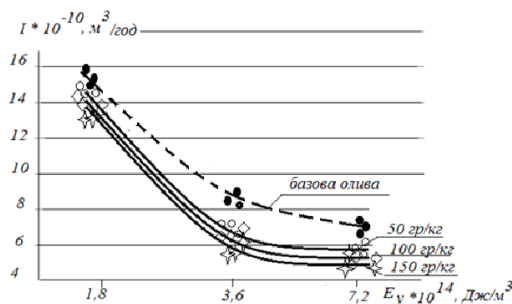


Рис. 2. Експериментальні та теоретичні залежності зміни об'ємної швидкості зношування від трибологічних властивостей базової оливи і концентрації фулеренової композиції в базової оливи

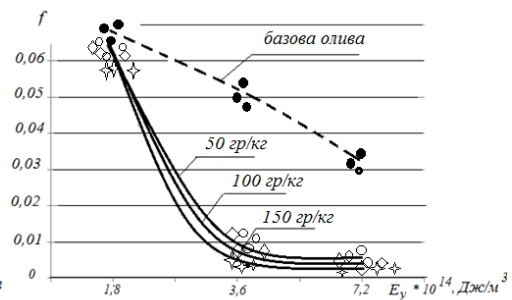


Рис. 3. Експериментальні та теоретичні залежності зміни коефіцієнта тертя трибосистеми від трибологічних властивостей мастильного середовища і концентрації фулеренової композиції

Крива «базова олива» відповідає об'ємній швидкості зношування та коефіцієнту тертя трибосистеми, де в змащувальному матеріалі не міститься фулеренових добавок. Нижні криві відповідають наступним концентраціям фулеренових композицій:

50 гр/кг = 0,5 гр/кг фулеренів + 49,5 гр/кг рослинної 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 рослинної ріпакової олії.

Такий діапазон зміни концентрацій фулеренових композицій обраний на підставі експериментальних досліджень, які були проведені на чотирьохкульковій

машині тертя [1]. Результатом цих досліджень є висновок, що збільшення фулеренової композиції більше 150 гр/кг позитивного ефекту не дає.

Виконаємо оцінку відтворюваності результатів вимірювань швидкості зношування та коефіцієнта тертя за допомогою критерію Кохрена, формула (5).

Значення дисперсії величини швидкості зношування, яка визначалася за допомогою методу штучних баз при різних значеннях трибологічних властивостей базових олив  $E_y$ , представлені в табл. 2, для коефіцієнта тертя, в табл. 3.

Таблиця 2

**Значення швидкості зношування при різних значеннях  $E_y$  для трибосистеми «сталь 40X + Бр.АЖ 9-4», концентрація фулеренової композиції 100 гр/кг**

$E_y$ , м/с	$S^2_{I\max}$	$\sum S^2_{Ii}$	$G_p$	$G_{\text{табл}}$
1,8	$(1,000 \times 10^{-10})^2$	$(1,259 \times 10^{-10})^2$	0,794	0,853
3,6	$(0,636 \times 10^{-10})^2$	$(0,795 \times 10^{-10})^2$	0,800	0,853
7,2	$(0,628 \times 10^{-10})^2$	$(0,778 \times 10^{-10})^2$	0,807	0,853

Таблиця 3

**Значення коефіцієнта тертя при різних значеннях  $E_y$  для трибосистеми «сталь 40X + Бр.АЖ 9-4», концентрація фулеренової композиції 100 гр/кг**

$E_y$ , м/с	$S^2_{f\max}$	$\sum S^2_{fi}$	$G_p$	$G_{\text{табл}}$
1,8	$(0,012)^2$	$(0,015)^2$	0,8	0,853
3,6	$(0,0030)^2$	$(0,0036)^2$	0,833	0,853
7,2	$(0,0020)^2$	$(0,0024)^2$	0,833	0,853

Аналіз розрахункових значень критерію Кохрена –  $G_p$  і табличних значень –  $G_{\text{табл}}$  при заданому рівні значущості 0,95 (кількість оцінюваних параметрів – 2, кількість повторів – 4), дозволяє зробити висновок, що умова (6) виконується, тобто результати вимірювань однорідні і відтворювані.

Аналіз отриманих експериментальних залежностей (точки на полі графіка) і їх порівняння з теоретичними кривими (суцільні лінії, які отримано за моделями робот [9, 10]), дозволяє зробити висновок, що похибка моделювання об'ємної швидкості зношування трибосистеми при зміні базових олив становить 5,2 – 8,3%. При цьому, більша похибка – 8,3%, відповідає меншим значенням  $E_y$ , а при збільшенні трибологічних властивостей базових олив, похибка дорівнює 5,2%.

Похибка моделювання коефіцієнта тертя трибосистеми при зміні базових олив з фулереновими композиціями не перевищує 12...14%.

**Обговорення результатів досліджень.** З аналізу отриманих залежностей представлених на рис. 2, можна зробити висновок, що застосування фулеренових композицій ефективно для базових олив, у яких трибологічні властивості знаходяться в межах  $E_y = (3,0...5,0) \cdot 10^{14}$  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.

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 оли-

вах, ефект зниження швидкості зношування становить 14,8%, теоретично отримана величина 7,6% зниження об'ємної швидкості зношування.

Аналіз представлених залежностей зміни коефіцієнта тертя при зміні  $E_y$  дозволяє стверджувати, що введення фулеренової композиції в гідравлічні оливи з низькими значеннями трибологічних властивостей,  $E_y=1,8 \cdot 10^{14}$  Дж/м<sup>3</sup>, зменшує коефіцієнт тертя на 18%, похибка моделювання становить 14%. Максимальний ефект зниження коефіцієнта тертя, що дорівнює 71 - 86%, характерний для олів з  $E_y=3,6 \cdot 10^{14}$  Дж/м<sup>3</sup>, похибка моделювання 12%.

Отримані експериментальні результати підтверджують теоретичні висновки, які наведено в роботах [9, 10], з похибкою моделювання 12 ... 14%. Експериментальним шляхом підтверджено теоретичний висновок про зменшення коливань коефіцієнта тертя зі збільшенням трибологічних властивостей базових олів.

Експериментальним шляхом підтверджено теоретичний висновок, що застосування базових олів, які перевищують значення  $E_y=3,6 \cdot 10^{14}$  Дж/м<sup>3</sup>, не приводить до зростання ефекту зниження коефіцієнта тертя від використання фулеренових композицій, коефіцієнт тертя залишається постійним. При цьому, величина зміни коефіцієнта тертя при застосуванні різних концентрацій знаходиться в межах 8%, похибка моделювання 5%.

**Висновки.** З аналізу представлених експериментальних значень і їх порівняння з теоретичними залежностями слідує, що математична модель формування мастильної плівки на поверхні тертя трибоелементів, яка розроблена в роботах [9, 10], адекватно відображає процес тертя та зношування і знаходиться в функціональному взаємозв'язку зі швидкістю зношування та коефіцієнтом тертя.

Експериментальні дослідження дозволили підтвердити теоретично отриманий в роботах [9, 10] результат, що застосування фулеренової композиції, що складається з розчинника і дрібнодисперсного порошку фулеренів, знижує швидкість зношування при зміні трибологічних властивостей базових олів на 20,1 ... 22,6%. Похибка моделювання становить 6,5 ... 9,2%.

Аналіз експериментальних досліджень дозволяє стверджувати, що введення фулеренової композиції в базові оливи з низькими значеннями трибологічних властивостей зменшує коефіцієнт тертя на 18%. Максимальний ефект зниження коефіцієнта тертя, що дорівнює 71 - 86%, характерний для базових олів з середніми значеннями трибологічних властивостей.

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 та коефіцієнт тертя між даними концентраціями на 7,8% (теоретичний результат 6,4%). Тому напрямок зниження об'ємної швидкості зношування та коефіцієнта тертя за рахунок збільшення концентрації фулеренової композиції більш 100 гр/кг можна визнати малоефективним і експериментально підтвердженим.

#### Список літератури

1. Vojtov V. A., Kravcov A. G., and Tsymbal B. M. Evaluation of Tribotechnical Characteristics of Tribosystems in the Presence of Fullerenes in the Lubricant / *FRICTION AND WEAR*, 2020, Vol. 41, No. 6, 521- 525. DOI: 10.3103/S1068366620060197
2. Anurag Singh, Prashant Chauhan, Mamatha T. G. A review on tribological performance of lubricants with nanoparticles additives // *Materials today: proceedings* Volume 25, Part 4, 2020, Pages 586-591 <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.245>

3. Sheida Shahnazar, Samira Bagheri, Sharifah Bee Abd Hamid Enhancing lubricant properties by nanoparticle additives // *International Journal of Hydrogen Energy* Volume 41, Issue 4, 2015, Pages 3153-3170 <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.12.040>
4. Imran Ali, Al Arsh Basheer, Anastasia Kucherova, Nariman Memetov, Tatiana Pasko, Kirill Ovchinnikov, Vladimir Pershin, Denis Kuznetsov, Evgeny Galunin, Vladimir Grachev, Alexey Tkachev Advances in carbon nanomaterials as lubricants modifiers // *Journal of Molecular Liquids* Volume 279, 2019, Pages 251-266 <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.01.113>
5. Yanli Yao, Xiaomin Wang, Junjie Guo, Xiaowei Yang, Bingshe Xu Tribological property of onion-like fullerenes as lubricant additive // *Materials Letters* Volume 62, Issue 16, 2007, Pages 2524-2527 <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2007.12.056>
6. L. Rapoport, Y. Feldman, M. Homyonfer, H. Cohen, J. Sloan, J. L. Hutchison, R. Tenne Inorganic fullerene-like material as additives to lubricants: structure–function relationship // *Wear* Volumes 225–229, Part 2, 1999, Pages 975-982 [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(99\)00040-X](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(99)00040-X)
7. F. A. Yunusov, A. D. Breki, E. S. Vasilyeva, O. V. Tolochko The influence of nano additives on tribological properties of lubricant oil // *Materials today: proceedings* Available online 14 February 2020 <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.447>
8. Xiaowei Li, Xiaowei Xu, Yong Zhou, Kwang-Ryeol Lee, Aiyang Wang Insights into friction dependence of carbon nanoparticles as oil-based lubricant additive at amorphous carbon interface // *Carbon*, Volume 150, 2019, Pages 465-474 <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2019.05.050>
9. Кравцов А.Г. Разработка математической модели взаимодействия электрически активных гетерогенных мелкодисперсных систем на границе раздела поверхность трения – смазочная среда // *Проблеми трибології*. – 2017. – № 3. – С. 89 – 99.
10. Кравцов А.Г. Моделирование формирования масляной пленки на поверхности трения при наличии фуллереновых добавок в смазочном материале и ее влияние на скорость изнашивания трибосистем // *Проблеми трибології*. – 2018. – № 1. – С. 69 – 77.
11. Войтов В. А., Захарченко М.Б. Интегральный параметр оценки трибологических свойств смазочных материалов // *Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту*. — Харків: УкрДАЗТ. — 2015 (2), № 151, 5—10

Стаття надійшла до редакції 03.04.2021.

**Войтов Віктор Анатолійович** – д.т.н., проф., завідувач кафедри транспортних технологій і логістики Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П. Василенка, [vavoitovva@gmail.com](mailto:vavoitovva@gmail.com)

**Кравцов Андрій Григорович** – к.т.н., доцент, декан факультету технологічних систем і логістики Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П. Василенка, [kravcov@gmail.com](mailto:kravcov@gmail.com)



V. A. VOJTOV, A. G. KRAVTSOV

## EXPERIMENTAL STUDIES OF TRIBOSYSTEMS IN THE PRESENCE OF FULLERENES IN LUBRICANT. PART 1. BY PARAMETER OF TRIBOLOGICAL CHARACTERISTICS OF BASE OIL

The paper presents the results of experimental research aimed at confirming the adequacy of the developed mathematical models method of forming a wear-resistant lubricating film on friction surfaces in the presence of fullerene compositions for different base oils.

From the analysis of the presented experimental values and their comparison with theoretical dependences it follows that the mathematical model of formation of a lubricating film on a friction surface of triboelements, which is developed in previous works of the authors, adequately reflects the process of friction and wear and is in a functional relationship with the wear rate and coefficient of friction.

Experimental studies have confirmed the theoretically obtained in previous works, the use of fullerene composition, consisting of a solvent-vegetable oil and a fine powder of fullerenes, reduces the rate of wear when changing the tribological properties of base oils by 20,1 ... 22,6%. The simulation error is 6,5 ... 9,2%.

Based on experimental studies, it is concluded that the introduction of fullerene composition in base oils with low values of tribological properties reduces the coefficient of friction by 18%. The maximum effect of reducing the coefficient of friction is equal to 71 - 86%, characteristic of base oils with average values of tribological properties.

Experimental studies have confirmed that the increase in the concentration of fullerene composition in the base oil from 50 g/kg up to 150 g/kg allows to reduce the volumetric wear rate and the coefficient of friction between these concentrations by 7,8% (theoretical result 6,4%). Therefore, the direction of reducing the volumetric wear rate and friction coefficient by increasing the concentration of the fullerene composition more 100 g/kg can be considered ineffective and experimentally confirmed.

**Keywords:** lubricating film, tribological properties of base oils, volume wear rate, coefficient of friction, fullerenes, tribosystem, adequacy of the mathematical model, simulation error

### References

1. Vojtov V. A., Kravcov A. G., and Tsymbal B. M. Evaluation of Tribotechnical Characteristics of Tribosystems in the Presence of Fullerenes in the Lubricant / *FRICITION AND WEAR*, 2020, Vol. 41, No. 6, 521- 525. DOI: 10.3103/S1068366620060197
2. Anurag Singh, Prashant Chauhan, Mamatha T. G. A review on tribological performance of lubricants with nanoparticles additives // *Materials today: proceedings* Volume 25, Part 4, 2020, Pages 586-591 <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.245>
3. Sheida Shahnazar, Samira Bagheri, Sharifah Bee Abd Hamid Enhancing lubricant properties by nanoparticle additives // *International Journal of Hydrogen Energy* Volume 41, Issue 4, 2015, Pages 3153-3170 <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.12.040>
4. Imran Ali, Al Arsh Basheer, Anastasia Kucherova, Nariman Memetov, Tatiana Pasko, Kirill Ovchinnikov, Vladimir Pershin, Denis Kuznetsov, Evgeny Galunin, Vladimir Grachev, Alexey Tkachev Advances in carbon nanomaterials as lubricants modifiers // *Journal of Molecular Liquids* Volume 279, 2019, Pages 251-266 <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.01.113>
5. Yanli Yao, Xiaomin Wang, Junjie Guo, Xiaowei Yang, Bingshe Xu Tribological property of onion-like fullerenes as lubricant additive // *Materials Letters* Volume 62, Issue 16, 2007, Pages 2524-2527 <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2007.12.056>
6. L. Rapoport, Y. Feldman, M. Homyonfer, H. Cohen, J. Sloan, J. L. Hutchison, R. Tenne Inorganic fullerene-like material as additives to lubricants: structure–function relationship // *Wear* Volumes 225–229, Part 2, 1999, Pages 975-982 [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(99\)00040-X](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(99)00040-X)

---

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

8. Xiaowei Li, Xiaowei Xu, Yong Zhou, Kwang-Ryeol Lee, Aiying Wang Insights into friction dependence of carbon nanoparticles as oil-based lubricant additive at amorphous carbon interface // *Carbon*, Volume 150, 2019, Pages 465-474 <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2019.05.050>

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

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

11. Voytov V. A., Zakharchenko M.B. Yntehral'nyy parametr otsenky trybolohycheskykh svoystv smazochnykh materyalov // *Zbirnyk naukovykh prats' Ukrayins'koyi derzhavnoyi akademiyi zaliznychnoho transportu.* — Kharkiv: UkrDAZT. — 2015 (2), № 151, 5—10