

**Кравцов А.Г.**

Харківський національний технічний  
університет сільськогосподарства  
ім. П.Василенка,  
E-mail: kravcov@gmail.com

**ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ  
ФУЛЕРЕНОВИХ КОМПОЗИЦІЙ В МОТОРНИХ  
ОЛИВАХ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ДВЗ**

УДК 621.891

DOI 10.37700/ts.2020.21.41-49

**Кравцов А.Г. «Оцінка ефективності застосування фулеренових композицій в моторних оливах при експлуатації ДВЗ»**

Наведено аналіз застосування фулеренів і фулеренових добавок до мастильних матеріалів для підвищення протизносних і антифрикційних властивостей. Показано, що фулеренові добавки не розчиняються (диспергуються) в рідких технічних оливах. Для поліпшення розчинності фулеренів необхідно попереднє їх розчинення в рослинних високоолеїнових оліях, а потім додавання отриманої композиції в технічні оливи (нафтові, напівсинтетичні, синтетичні).

Метою даної роботи є експериментальне дослідження ефективності застосування фулеренових композицій в моторних оливах і ступеня їх впливу на ефективну потужність і питому витрату палива дизельного двигуна. Маса фулеренової композиції 100 гр на один кілограм моторної оливи. Склад фулеренової композиції - 0,75 гр фулеренів і 99,25 гр рослинної ріпакової олії. Загальна маса фулеренової композиції 100 гр вводилася в 1000 гр базової моторної оливи М-10Г2к, (10% мас.).

Експериментальним шляхом отримані залежності ефективної потужності і питомої витрати палива при застосуванні в моторних оливах фулеренової композиції (склад - 0,75 гр фулеренів та 99,25 гр рослинної ріпакової олії, 10% мас.). Експериментально встановлено, що використання моторної оливи з фулереновою композицією дозволяє отримати наступні показники під час випробування дизеля Д-243 на стенді:

- ефективна потужність дизеля збільшилась зі значень 60 кВт до значень 64, 56 кВт, тобто на 7,5%.
- питома витрата палива зменшилась зі значень 220 гр/кВт\*год до значень 186 гр/кВт\*год, тобто на 15,45%.

На основі отриманих експериментальних результатів зроблено висновки, що використання фулеренової композиції в моторних оливах дозволяє знизити питому витрату палива двигуном, що призведе до економії палива під час експлуатації транспортних засобів без зменшення їх ефективної потужності.

**Ключові слова:** фулерени, фулеренові композиції; рослинні олії, моторні оливи, двигун внутрішнього згорання, ефективна потужність, питома витрата палива

**Кравцов А.Г. «Оценка эффективности применения фуллереновых композиций в моторных маслах при эксплуатации ДВС»**

Приведен анализ применения фуллеренов и фуллереновых добавок к смазочным материалам для повышения противоизносных и антифрикционных свойств. Показано, что фуллереновые добавки не растворяются (диспергируются) в жидких технических маслах. Для улучшения растворимости фуллеренов необходимо предварительное их растворение в растительных высокоолеиновых маслах, а затем добавление полученной композиции в технические масла (нефтяные, полусинтетические, синтетические).

Целью данной работы является экспериментальное исследование эффективности применения фуллереновых композиций в моторных маслах и степени их влияния на эффективную мощность и удельный расход топлива дизельного двигателя. Масса фуллереновой композиции 100 гр на один килограмм моторного масла. Состав фуллереновой композиции - 0,75 гр фуллеренов и 99,25 гр растительного рапсового масла. Общая масса фуллереновой композиции 100 гр вводилась в 1000 гр базового моторного масла М-10Г2к, (10% мас.).

Экспериментальным путем получены зависимости эффективной мощности и удельного расхода топлива при использовании в моторном масле фуллереновой композиции (состав - 0,75 гр фуллеренов и 99,25 гр рапсового растительного масла, 10% мас.). Экспериментально установлено, что использование моторного масла с фуллереновой композицией позволяет получить следующие показатели во время испытания дизеля Д-243 на стенде:

- эффективная мощность дизеля увеличилась со значений 60 кВт до значений 64, 56 кВт, что составляет 7,5%.
- удельный расход топлива уменьшился со значений 220 гр/кВт\*час до значений 186 гр/кВт\*час, что составляет 15,45%.

На основании полученных экспериментальных результатов сделан вывод, что использование фуллереновых композиций в моторных маслах позволяет снизить удельный расход топлива во время эксплуатации транспортных средств без уменьшения эффективной мощности.

**Ключевые слова:** фуллерены, фуллереновые композиции; растительные масла, моторные масла, двигатель внутреннего сгорания, эффективная мощность, удельный расход топлива

A.G. Kravcov "Evaluation of the efficiency of using fullerene compositions in engine oils during the operation of internal combustion engines"

An analysis of the application of fullerenes and fullerene additives to lubricants to improve antiwear and antifriction properties is presented. It was shown that fullerene additives do not dissolve (disperse) in liquid technical oils. To improve the solubility of fullerenes, it is necessary to first dissolve them in high oleic vegetable oils, and then add the resulting composition to technical oils (petroleum, semi-synthetic, synthetic). From the analysis of the presented material, it was concluded that the use of fullerene compositions in technical lubricants is a promising direction for the operation of internal combustion engines (ICE). This will reduce friction losses in the tribosystems of the ICE during operation. Reducing friction losses will lead to fuel economy, while reducing the wear rate of tribosystem materials, which will contribute to an increase in resource.

The purpose of this work is an experimental study of the effectiveness of the use of fullerene compositions in engine oils and the degree of their influence on the effective power and specific fuel consumption of a diesel engine. Fullerene composition mass 100 gram per kilogram of engine oil. Fullerene composition - 0,75 gram fullerenes and 99,25 gram vegetable rapeseed oil. The total mass of the fullerene composition 100 gram introduced in 1000 gram base engine oil M-10G<sub>2к</sub> (10% masses).

The dependences of the effective power and specific fuel consumption when using a fullerene composition in engine oil have been obtained experimentally (composition - 0,75 gram fullerenes and 99,25 gram vegetable rapeseed oil, 10% masses). It has been experimentally established that the use of motor oil with a fullerene composition makes it possible to obtain the following indicators during testing of the D-243 diesel engine at the stand:

- the effective diesel power has increased from 60 kW to 64.56 kW, which is 7,5%.
- specific fuel consumption decreased from 220 g/kW\*hour to 186 g/kW\*hour, which is 15,45%.

On the basis of the obtained experimental results, it was concluded that the use of fullerene compositions in motor oils makes it possible to reduce the specific fuel consumption during the operation of vehicles without reducing the effective power.

The verification of the correspondence of the obtained results of bench experiments to the normal distribution law, reproducibility from experiment to experiment and homogeneity. It was found that the results of experiments in determining the effective power and specific fuel consumption from experiment to experiment are reproducible and homogeneous.

**Keywords:** fullerenes, fullerene compositions; vegetable oils, engine oils, internal combustion engine, effective power, specific fuel consumption

## Актуальність проблеми

В останні роки з'явився ряд наукових статей, де представлені результати досліджень впливу фулеренових добавок до мастильних матеріалів на процеси тертя і зношування металів і зроблено висновок про перспективність використання таких добавок. Зокрема, до таких систем відносяться кластери фулерена. Самі молекули фулерену є новою алотропною формою вуглецю, відкритою в 1985 році.

Найбільш стабільною з них є фулерен C<sub>60</sub>. На сьогоднішній день великий інтерес викликає застосування фулеренів C<sub>60</sub>, як добавка до рідких мастильних матеріалів. Цікавою і важливою особливістю фулеренових добавок стало те, що фулерени добре розчиняються в широкому класі органічних і неорганічних розчинників. При цьому відзначена погана розчинність фулеренів в технічних оливах (мінеральних, напівсинтетичних і синтетичних). На сьогоднішній день визначені і проаналізовані розчинності C<sub>60</sub> у великій кількості рідин. Показано, що розчинність фулеренів падає з ростом полярності розчинника. Виявлено ряд незвичайних властивостей розчинів фулерену, так для деяких розчинників був виявлений ефект аномальної залежності розчинності фулерена від температури. При температурі близько 280°K в цих системах спостерігається максимум розчинності C<sub>60</sub>, після якого вона починає знижуватися.

Ще одним цікавим явищем, які спостерігаються в розчинах фулерена C<sub>60</sub>, є процеси утворення і зростання кластерів, які вказують на близькість багатьох розчинів C<sub>60</sub> до класу колоїдних систем. Визначальним моментом цього явища служить той факт, що розмір фулерена лежить на межі визначення поняття колоїдної частинки (згідно колоїдної хімії, колоїдні частинки мають розміри від одного нанометра до декількох мікрометрів). Великий вплив на цей процес також надає полярність розчинника.

Використання добавок фулеренів до технічних рідких мастильних матеріалів ставить ряд питань про їх ефективність, тобто вплив на протизносні і антифрикційні

властивості. Інтерес до даного явища має як фундаментальний, так і прикладний характер, що дозволить розробляти концепції їх застосування.

### Аналіз останніх досліджень

Авторами роботи [1] представлено огляд літератури по мастильним матеріалам з додаванням наночастинок. Проаналізовано вплив наночастинок на триботехнічні характеристики оливо. У роботі відзначено, що використання нанодобавок до мастильних матеріалів призводить до підвищення в'язкості базового середовища, високої несучої здатності трибосполучень, зниження коефіцієнта тертя, підвищення зносостійкості. Робота [2] містить висновки, що трибологічні характеристики мастильного матеріалу можна поліпшити застосуванням наноприсадок. Додавання наночастинок до звичайних базових оливо є перспективним напрямком. Робота присвячена інформаційному огляду застосування нанодобавок до рідких мастильних матеріалів і перспективам його використання при виробництві технічних оливо. Аналогічні висновки про перспективність застосування наноматеріалів в рідких мастильних матеріалах робиться авторами роботи [3].

Роботи [4-6] присвячені фулеренам, як добавкам до мастильних матеріалів. Автори відзначають, що використання фулеренів знижує коефіцієнт тертя і підвищує зносостійкість трибосполучень. В роботі [6] зазначається, що концентрація фулеренової добавки повинна бути в межах 0,5 ... 2,0% мас. В роботі [7] наведено результат застосування фулерена C<sub>60</sub>. Автори відзначають позитивний ефект, проте роблять висновок, що механізм сенергізма фулеренів з базовою оливою неясний і вимагає подальших досліджень. При цьому в роботі відзначено, що зниження коефіцієнта тертя при добавці фулеренів в олії може досягати 90% в порівнянні з базовою оливою.

Аналіз робіт, присвячених застосуванню фулеренів, як добавок до мастильних матеріалів, дозволяє зробити висновок, що фулерени не диспергують (розчиняються) у всіх технічних мастильних матеріалах [8-10].

В роботі [11] виконані теоретичні дослідження формування плівки оливи 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 електростатичного поля в об'ємі рідини. Теоретичним шляхом встановлено, що застосування «розчинників» фулеренів, в якості яких можуть виступати високоолеїнові рослинні олії, можна «запустити» процес міцелоутворення, де ядром міцели є молекула фулерену, оточена молекулами 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 утворених міцел.

В роботі [12] представлені результати моделювання формування мастильної плівки на поверхні тертя при наявності розчинів фулеренів (фулерени + рослинна олія) в змащувальному матеріалі і їх вплив на швидкість зношування трибосистем. За результатами моделювання встановлено, що величина напруженості електростатичного поля поверхні тертя є більш значущим фактором при формуванні товщини плівки оливи на поверхні тертя, ніж величина електростатичного поля мастильного матеріалу. Встановлено раціональні концентрації фулеренів і рослинної олії, як добавки в базові мастильні матеріали, що дозволить знизити об'ємну швидкість зношування трибосистем.

З аналізу представленого матеріалу можна зробити висновок, що застосування фулеренових композицій в технічних мастильних матеріалах є перспективним напрямком, наприклад, для експлуатації двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ). Це дозволить знизити

втрати на тертя в трибосистемах ДВЗ, що призведе до економії палива, при одночасному зниженні швидкості зношування матеріалів трибосистем, що призведе до збільшення ресурсу.

### Формулювання мети дослідження

Метою даної роботи є експериментальне дослідження ефективності застосування фулеренових композицій в моторних оливах і ступеня їх впливу на ефективну потужність і питому витрату палива дизельного двигуна.

### Методичний підхід в проведенні досліджень

Програма стендових експериментальних досліджень включає визначення регуляторних та навантажувальних характеристик дизеля на різних швидкісних режимах.

Регуляторні та навантажувальні характеристики визначались відповідно чинного стандарту ГОСТ 14846-81 «Двигатели автомобильные. Методы стендовых испытаний».

Для експериментального дослідження використовувалися такі види палива та моторних олив:

- штатне паливо – мінеральне дизельне паливо марки “F” виду “Г” відповідно ДСТУ 4840:2007;
- моторна олива М-10Г<sub>2к</sub>, відповідно до ТУ;
- моторна олива М-10Г<sub>2к</sub> з фулереновою композицією.

Маса фулеренової композиції 100 г на один кілограм моторної оливи. Склад фулеренової композиції - 0,75 гр фулеренів та 99,25 гр рослинної ріпакової олії. Загальна маса фулеренової композиції 100 гр вводилася в 1000 гр базової моторної оливи М-10Г<sub>2к</sub>, (10% мас.).

В процесі стендових досліджень розглядався робочий процес автотракторного дизеля Д-243. Двигун 4Ч11/12,5 (Д-243) – чотиритактний, чотирьохциліндровий, з вільним впуском повітряного заряду, з рідинною системою охолодження і неподіленою формою камери згоряння (типу ЦНІДІ).

Порівняльні стендові випробування дизельного двигуна виконувались на електрогальмівному стенді СТЭУ-28 ГОСНІПІ, що призначений для обкатки двигунів потужністю від 10 до 100 к. с. (7,35 кВт до 73,55 кВт) і числом обертів від 1000 до 3400 хв<sup>-1</sup>. Живлення здійснюється від трифазної електричної мережі 220/380 В.

Електродвигун стенду працює в двох режимах: руховому і генераторному; у руховому режимі – при холодній обкатці, а в генераторному – при гарячій обкатці і випробуванні. Для регулювання числа обертів двигуна і для завантаження його в режимі генератора в ланцюг ротора включають рідинний реостат з об'ємом резервуару 300 л.

Випробування проводили згідно ГОСТ 18509-88 з визначенням наступних показників.

Крутний момент дизеля визначався за формулою:

$$M_{KP} = L \cdot P_T, \quad (1)$$

де  $L$  – плече гальма, м ( $L=0,716$  м);

$P_T$  – гальмівна сила, Н.

Ефективна потужність дизеля визначалась за формулою:

$$N_e = 0,75 \cdot 10^{-4} \cdot n \cdot P_T, \quad (2)$$

де  $N_e$  – ефективна потужність, кВт;

$n$  – частота обертання колінчастого вала дизеля, хв.<sup>-1</sup>.

Годинна витрата палива дизелем визначалась за формулою:

$$G_T = 3,6 \cdot \frac{\Delta G}{\tau}, \quad (3)$$

де  $G_T$  – годинна витрата палива, кг/год;

$\Delta G$  – витрата палива за дослід, гр;

$\tau$  – час витрати палива, с.

Питома ефективна витрата палива дизелем визначалась за формулою:

$$g_e = \frac{G_T}{N_e}, \quad (4)$$

де  $g_e$  – питома ефективна витрата палива, гр/кВт·год.

Найбільш достовірно відтворює експлуатаційні умови автомобіля європейський їздовий цикл, який передбачає роботу на холостому ході, режим розгону, сталий режим і режим гальмування. При цьому імітація двигуном даного руху здійснюється низкою зовнішніх швидкісних, регуляторних, часткових і навантажувальних характеристик.

Враховуючи наявність на автотракторному двигуні Д 243 всережимного регулятора, значну інформативність надає його робота в режимі повного навантаження регуляторної гілки, оскільки транспортні дизелі більшу частину часу експлуатуються на режимах цієї характеристики і саме на цих режимах підвищені витрати палива.

Випробування дизеля, з визначенням зазначених вище параметрів і побудовою регуляторної характеристики проводили в два етапи.

Перший етап – побудова регуляторної характеристики, коли в системі мащення дизеля застосовувалася моторна олива М-10Г<sub>2к</sub>, відповідно до ТУ.

Другий етап – побудова регуляторної характеристики, коли в системі мащення дизеля застосовувалася моторна олива М-10Г<sub>2к</sub>, з фулереновою композицією (10% мас.).

При переході до другого етапу з дизеля, в гарячому стані, зливали моторну оливу і промивали за допомогою промивальної оливи МП протягом 15 хвилин на холостому режимі. Потім очищали масляний відцентровий фільтр і систему мащення заправляли оливою М-10Г<sub>2к</sub>, з фулереновою композицією.

Після заміни моторної оливи проводили припрацювання трибосистем дизеля протягом 7 годин.

### Результати досліджень

За результатами обробки експериментальних даних побудовані регуляторні характеристики для роботи дизеля при використанні моторної оливи М-10Г<sub>2к</sub> та моторної оливи М-10Г<sub>2к</sub> з фулереновою композицією, рис. 1.

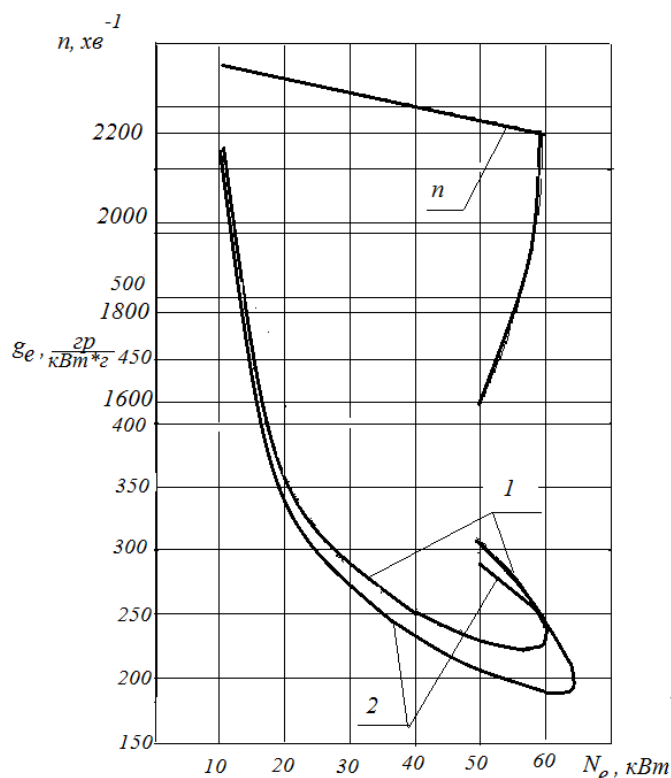


Рис. 1. Регуляторна характеристика дизеля Д-243  
 1 – моторна олива М-10Г<sub>2к</sub>; 2 – моторна олива М-10Г<sub>2к</sub> з фулереновою композицією

### Аналіз результатів досліджень

Використання фулеренової композиції в моторній оливі під час випробування дизеля на стенді дозволяє отримати наступні показники.

Ефективна потужність дизеля збільшилась зі значень 60 кВт до значень 64, 56 кВт, тобто на 7,5%.

Питома витрата палива зменшилась зі значень 220 гр/кВт\*год до значень 186 гр/кВт\*год, тобто на 15,45%.

На основі отриманих експериментальних результатів, можна зробити наступні висновки. Використання фулеренової композиції в моторних оливах, (склад - 0,75 г фулеренів та 99,25 г рослинної ріпакової олії, 10% мас.), дозволяє знизити питому витрату палива двигуном, що призведе до економії палива під час експлуатації транспортних засобів без зменшення їх ефективності.

Отримані результати було перевірено на відповідність нормальному закону розподілу експериментальних даних та відтворюваності результатів експерименту від досліду до досліду.

Середньоквадратичне абсолютне відхилення для ефективної потужності дизеля:

$$CAO = \sum |N_{e,i} - N_{e,cp}| / n , \quad (5)$$

- для питомої витрати палива:

$$CAO = \sum |g_{e,i} - g_{e,cp}| / n , \quad (6)$$

де  $N_{e,i}$  та  $N_{e,cp}$  – поточне значення і середнє значення ефективної потужності дизеля;

$g_{e,i}$  та  $g_{e,cp}$  – поточне значення і середнє значення питомої витрати палива дизеля;

$n$  – кількість дослідів, згідно плану експерименту з урахуванням трьох повторів.

Для вибірки, що має нормальний закон розподілу, є справедливим вираз:

$$\left| \frac{CAO}{S} - 0,7979 \right| < \frac{0,4}{\sqrt{n}} \quad (7)$$

де  $S$  – середньоквадратичне відхилення, яке визначається за формулою:

- для ефективної потужності дизеля;

$$S_{Ne} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (N_{e,i} - N_{e,cp})^2}, \quad (8)$$

- для питомої витрати палива дизеля;

$$S_{ge} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (g_{e,i} - g_{e,cp})^2}, \quad (9)$$

Аналіз результатів розрахунків наведених у таблиці 1 дозволяє зробити висновок, що умова (7) виконується, тобто отриманий експериментальний обсяг вибірки відповідає нормальному закону розподілу.

Таблиця 1

**Результати розрахунків на відповідність нормальному закону розподілу**

Параметр	CAO	Середнє значення	S		$\frac{0,4}{\sqrt{n}}$
Ефективна потужність, $N_e$ , кВт	2,73	63,542	3,24	0,044	0,046
Питома витрата палива, $g_e$ , гр/кВт*год	7,82	186,0	9,3	0,042	0,046

Результати експериментальних досліджень згідно плану експерименту були перевірені на однорідність і відтворюваність від досліду до досліду за критерієм Кохрена:

$$G_p = \frac{S_{\max}^2}{\sum_{i=1}^n S_i^2}, \quad (10)$$

де  $S_{\max}^2$  - найбільше значення дисперсії при вимірюванні ефективної потужності і питомої витрати палива;

$n$  - кількість дослідів при вимірюванні ефективної потужності і питомої витрати палива;

$S_i$  - значення дисперсії  $i$ -го дослідів.

Перевірці підлягала гіпотеза:

$$G_p < G_{табл}, \quad (11)$$

де  $G_{табл}$  - табличне значення критерія Кохрена при заданому рівні значимості 0,95.

При кількості порівнюваних дисперсій  $k=25$  та кількості дослідів  $n=75$ , табличне значення критерія Кохрена дорівнює:

$$G_{табл} = 0,0165.$$

Розрахункове значення критерія Кохрена, формула (10), дорівнює:

- для ефективної потужності  $G_p = 0,00905$ ;

- для питомої витрати палива  $G_p = 0,00874$ .

Умова (11) виконується, отже результати експериментів при визначенні ефективної потужності і питомої витрати палива від досліду до досліду відтворювані і однорідні.

### Висновки

Експериментальним шляхом отримані залежності ефективної потужності і питомої витрати палива при застосуванні в моторних оливах фулеренової композиції (склад - 0,75 гр фулеренів та 99,25 гр рослинної ріпакової олії, 10% мас.). Експериментально встановлено, що використання моторної оливи з фулереновою композицією дозволяє отримати наступні показники під час випробування дизеля Д-243 на стенді:

- ефективна потужність дизеля збільшилась зі значень 60 кВт до значень 64, 56 кВт, тобто на 7,5%.

- питома витрата палива зменшилась зі значень 220 гр/кВт\*год до значень 186 гр/кВт\*год, тобто на 15,45%.

На основі отриманих експериментальних результатів можна зробити висновок, що використання фулеренової композиції в моторних оливах дозволяє знизити питому витрату палива двигуном та призведе до економії палива під час експлуатації транспортних засобів без зменшення їх ефективної потужності.

### Список використаних джерел

1. 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>
2. 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>
3. 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>
4. 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>
5. 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)
6. 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>
7. 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>
8. Безмельницын В. Н., Елецкий А. В., Окунь М. В. Фуллерены в растворах // *Успехи физических наук*. — 1998, № 11, 1195—1220
9. Гиндзбург Б. М., Байдакова М. В., Киреенко О. Ф. [и др.]. Влияние фуллеренов C<sub>60</sub>, фуллереновых саж и других углеродных материалов на граничное трение скольжение металлов // *Журнал технической физики*. — 2000, № 12, 87—97
10. Яхьяев Н. Я., Бегов Ж. Б., Батырмурзаев Ш. Д. Новая смазочная композиция для модификации поверхностей трибосопряжений судового малоразмерного дизеля // *Вестник АГТУ. Сер.: Морская техника и технология*. — 2009, № 1, 47—52



11. Кравцов А. Г. Разработка математической модели взаимодействия электрически активных гетерогенных мелкодисперсных систем на границе раздела поверхность трения — смазочная среда // *Проблемы трибологии*. — 2017, № 1, 89—99

12. Кравцов А. Г. Моделирование формирования масляной пленки на поверхности трения при наличии фуллереновых добавок в смазочном материале и ее влияние на скорость изнашивания трибосистем // *Проблемы трибологии*. — 2018, № 1, 69—77

## References

1. 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>

2. 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>

3. 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>

4. 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>

5. 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)

6. 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>

7. 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>

8. Bezmel'nitsyn V. N., Yeletskiy A. V., Okun' M. V. Fullereny v rastvorakh // *Uspekhi fizicheskikh nauk*. — 1998, № 11, 1195—1220

9. Gindzburg B. M., Baydakova M. V., Kireyenko O. F. [i dr.]. Vliyaniye fullerenov S60, fullerenovykh sazh i drugikh uglerodnykh materialov na granichnoye treniye skol'zheniye metallov // *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*. — 2000, № 12, 87—97

10. Yakh'yayev N. YA., Begov ZH. B., Batyrmurzayev SH. D. Novaya smazochnaya kompozitsiya dlya modifikatsii poverkhnostey tribosopryazheniy sudovogo malorazmernogo dizelya // *Vestnik AGTU. Ser.: Morskaya tekhnika i tekhnologiya*. — 2009, № 1, 47—52

11. Kravcov A. G. Razrabotka matematicheskoy modeli vzaimodeystviya elektricheskii aktivnykh geterogennykh melkodispersnykh sistem na granitse razdela poverkhnost' treniya — smazochnaya sreda // *Problemi tribologii*. — 2017, № 1, 89—99

12. Kravcov 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, 69—77