

УДК 621.81:539.4

## ОЦЕНКА ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРИБОСИСТЕМ ПРИ НАЛИЧИИ ФУЛЛЕРЕНОВ В СМАЗОЧНОМ МАТЕРИАЛЕ

В. А. ВОЙТОВ<sup>a</sup>, А. Г. КРАВЦОВ<sup>a</sup>, Б. М. ЦЫМБАЛ<sup>b+</sup>

Представлены экспериментальные исследования триботехнических характеристик смазочных материалов с фуллереновыми композициями. Показано, что рациональной концентрацией фуллереновой добавки может выступать величина: 0,75 г фуллеренов и 99,25 г растительного олеинового масла в качестве растворителя фуллеренов, с последующим добавлением данной композиции на 1 кг базового масла. В объемной концентрации это составит 10 %. Приведены результаты, которые подтверждают, что фуллереновые добавки улучшают противоизносные свойства базовых смазочных материалов на 26,6 %. При этом диапазон работы противоизносных присадок в смазочном материале увеличивается на 40,9 %. На противозадирные свойства базового смазочного материала фуллереновые добавки влияния не оказывают. Применение фуллереновых добавок наиболее эффективно снижает коэффициент трения (на 32,4—86%), по сравнению со скоростью изнашивания (на 20—25 %). Экспериментальными исследованиями установлено, что направление снижения объемной скорости изнашивания и коэффициента трения за счёт увеличения концентрации фуллереновой добавки более 100 г/кг можно признать малоэффективным.

**Ключевые слова:** трибосистема, триботехнические характеристики, фуллерены, фуллереновые композиции, смазочные материалы, скорость изнашивания, базовое масло, коэффициент трения, растительные масла.

DOI: 10.32864/0202-4977-2020-41-6-704-710

**Введение.** Интенсивность изнашивания трибосистем является основным определяющим параметром их долговечности и зависит от ряда показателей, в том числе и от физико-механических свойств смазочного материала, который применяется при эксплуатации. Трибологические и эксплуатационные характеристики смазочного материала зависят от наличия в их составе пакетов функциональных присадок и добавок рациональной концентрации, при которой достигается минимум коэффициента трения и интенсивности изнашивания трибосистем.

На сегодняшний день большой интерес вызывает применение наноуглеродных присадок и добавок (фуллеренов С60) [1]. В работе [2] представлены результаты исследований влияния фуллереновых добавок к смазочным материалам на процессы трения и изнашивания металлов в условиях граничной смазки и сделан вывод о перспективности использования таких добавок.

В работе [3] представлены результаты экспериментальных исследований влияния фуллереновой смазочной композиции в моторном масле на трибологические характеристики узлов трения судового дизеля. Экспериментально установлена оптимальная концентрация смазочной композиции (наноразмерные частицы фуллеренов 0,82 %, графитовой сажи — 0,68 %, моторного масла — 98,5 %). По мнению авторов образующиеся поверхностные плёнки позволяют уменьшить коэффициент трения, улучшить виброшумовые характеристики судовых малоразмерных дизелей.

<sup>a</sup> Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства им. Петра Василенко. Украина, 61002, г. Харьков, ул. Алчевских, 44.

<sup>b</sup> Национальный университет гражданской защиты Украины. Украина, 61023, г. Харьков, ул. Чернышевская, 94.

<sup>+</sup> Автор, с которым следует вести переписку: tsembalbogdan@ukr.net.

Анализ работ, посвящённых применению фуллеренов, как добавок к смазочным материалам, позволил сделать вывод, что фуллерены не диспергируются во всех технических маслах, как минеральных, так и синтетических [1, 2]. Однако, фуллерены хорошо распределяются по объёму в растительных маслах, особенно высокоолеиновых [4]. Следовательно, используя данное явление можно предварительно диспергировать фуллерены в высокоолеиновом растительном, например, рапсовом масле, а затем ввести данную композицию в смазочный материал. Таким образом можно реализовать механизм мицеллообразования вблизи электростатически заряженной поверхности трения, что позволит создать прочные поверхностные слои.

В работах [5, 6] выполнены теоретические исследования формирования масляной плёнки на поверхности трения при введении фуллеренов в растительное масло с последующим введением в смазочный материал. Математическая модель разработана на основе взаимодействия электрически активных гетерогенных мелкодисперсных систем на границе раздела поверхность трения — смазочная среда и описывается дифференциальным уравнением Пуассона. Показана связь электростатического поля поверхности трения и электрического поля в объёме жидкости, а также роль поверхности трения на процесс образования кластеров и мицелл в плёнке смазочного материала у поверхности трения. Установлено, что под действием напряженно-деформированного состояния поверхностных слоёв поверхность трения выступает в качестве “генератора электростатического силового поля”, которое оказывает влияние на формирование электрического поля в объёме масляной плёнки, имеющей мицеллярное строение [7]. Получены выражения для расчёта величины напряжённости суммарного электрического поля системы “поверхность трения + смазочный материал”.

**Цель работы** — исследование трибологических характеристик трибосистем при наличии фуллереновых добавок в смазочном материале, где для диспергирования фуллеренов используется высокоолеиновое рапсовое масло.

**Материалы и методы исследований.** В процессе экспериментальных исследований использовались: четырёхшариковая машина трения и универсальная машины трения, конструкция которой описана в работе [8]. Четырёхшариковая машина трения применялась согласно ГОСТ 9490-75 для оценки трибологических характеристик смазочных материалов: показателя износа; критической нагрузки; нагрузки сваривания. Универсальная машина трения [8] применялась для определения скорости изнашивания и коэффициента трения различных фуллереновых композиций. Схема испытаний “кольцо—кольцо”,  $K_{вз} = 0,5$ . Нагрузка  $N = 400...1800$  Н; скорость скольжения  $v_{ск} = 0,1...0,9$  м/с.

В качестве объектов исследования были выбраны следующие материалы: сталь 40Х, HRC 55...58, (аналоги 5135 и 5140 США), бронза Бр.АЖ 9-4 НВ 110, (аналог С61900 США). В качестве базовой смазочной среды применялось моторное масло М-10Г<sub>2к</sub> (минеральное масло, по вязкости соответствует SAE 30, по эксплуатационным характеристикам API CC, аналог масла: ROTELLA SX 30 SHELL). Трибологические свойства моторного масла М-10Г<sub>2к</sub> приведены в работе [9] и равны  $E_y = 3,6 \cdot 10^{14}$  Дж/м<sup>3</sup>.

Фуллереновые композиции приготавливали в следующих массовых концентрациях.

1. Базовое масло М-10Г<sub>2к</sub>, не содержит фуллереновых композиций.
2. Фуллереновая добавка 50 г/кг. Содержит 0,5 г фуллеренов и 49,5 г растительного рапсового олеинового масла. Добавка массой 50 г вводилась в 1000 г базового масла.
3. Фуллереновая добавка 100 г/кг. Содержит 0,75 г фуллеренов и 99,25 г растительного рапсового олеинового масла. Добавка массой 100 г вводилась в 1000 г базового масла.
4. Фуллереновая добавка 150 г/кг. Содержит 1,0 г фуллеренов и 149,0 г растительного рапсового олеинового масла. Добавка массой 150 г вводилась в 1000 г базового масла.
5. Фуллереновая добавка 200 г/кг. Содержит 1,5 г фуллеренов и 198,5 г растительного рапсового олеинового масла. Добавка массой 200 г вводилась в 1000 г базового масла.

6. Фуллереновая добавка 250 г/кг. Содержит 2,0 г фуллеренов и 248,0 г растительного рапсового олеинового масла. Добавка массой 250 г вводилась в 1000 г базового масла.

**Результаты исследований и их обсуждение.** Первым этапом испытаний было оценка трибологических характеристик, указанных выше композиций на четырёхшариковой машине трения.

Результаты испытаний согласно ГОСТ 9409–75 приведены в таблице.

**Трибологические характеристики моторного масла М-10Г<sub>2к</sub> при различных концентрациях фуллереновых композиций**

№ п/п	Смазочная среда	Показатель износа, мм	Критическая нагрузка, Н	Нагрузка сваривания, Н
1	Базовое масло М-10Г <sub>2к</sub>	0,45	980	2450
2	М-10Г <sub>2к</sub> + добавка 50 г/кг	0,40	1235	2450
3	М-10Г <sub>2к</sub> + добавка 100 г/кг	0,35	1303	2450
4	М-10Г <sub>2к</sub> + добавка 150 г/кг	0,34	1381	2450
5	М-10Г <sub>2к</sub> + добавка 200 г/кг	0,33	1381	2450
6	М-10Г <sub>2к</sub> + добавка 250 г/кг	0,33	1381	2450

Анализ результатов испытаний, которые приведены в таблице, позволяют сделать вывод, что фуллереновые добавки оказывают влияние только на противоизносные свойства базового масла.

Показатель износа улучшился на 26,6 %. Однако, увеличение концентрации добавки более, чем 100 г/кг положительного эффекта не вызывает.

Критическая нагрузка, которая характеризует величину диапазона работы противоизносных присадок, увеличилась на 40,9 %. Однако после концентрации фуллереновой добавки 100 г/кг, положительного эффекта не вызывает.

Нагрузка сваривания, которая характеризует наличие противозадирных свойств у смазочного материала, не изменилась. Следовательно, фуллереновая добавка в любых концентрациях не является противозадирной присадкой.

По результатам экспериментальных исследований на четырехшариковой машине трения можно сделать следующие выводы.

1. Фуллереновые добавки улучшают противоизносные свойства смазочных материалов на 26,6 %. При этом диапазон увеличения противоизносных свойств достигает 40,9 %. На противозадирные свойства фуллереновые композиции влияния не оказывают.

2. Рациональной концентрацией фуллереной добавки в базовом смазочном материале можно считать величину 100 г/кг. Дальнейшее увеличение концентрации положительного эффекта не имеет.

Вторым этапом испытаний эффективности фуллереновых добавок было экспериментальная оценка объёмной скорости изнашивания и коэффициента трения указанных выше композиций на универсальной машине трения по схеме “кольцо—кольцо”.

На основании экспериментальных исследований, которые были получены на четырёхшариковой машине трения, были выбраны следующие величины концентраций фуллереновых добавок в базовом моторном масле (БМ) М-10Г<sub>2к</sub>: БМ + 50 г/кг; БМ + 100 г/кг; БМ + 150 г/кг.

Перед установкой на машину трения образцы шлифовались и притирались по общепринятой методике ГОСТ 23.210–80.

Для повышения воспроизводимости результатов применяли предварительную приработку образцов согласно работы [10] и контролировали сопряжение поверхностей скольжения, характеризующее следами трения на площади не менее 90 % рабочей поверхности скольжения каждого образца.

В процессе проведения эксперимента определяли суммарную объёмную скорость изнашивания подвижного и неподвижного трибоэлементов методом искусственных баз, ГОСТ 23.301–78.

Скорость изнашивания определялась на пути трения 5000 м. Путь трения подбирался экспериментально из условий получения достоверных данных об износе.

Результаты экспериментальных исследований изменения объёмной скорости изнашивания  $I$ ,  $\text{м}^3/\text{ч}$ , для трибосистемы “сталь 40X + Бр.АЖ 9-4” при изменении нагрузки  $N$ , Н и скорости скольжения  $v_{\text{ск}}$ , м/с, представлены на рис. 1 и рис. 2. Кривая 1 соответствует объёмной скорости изнашивания трибосистемы, где в смазочном материале М-10Г<sub>2к</sub> не содержится фуллереновых композиций.

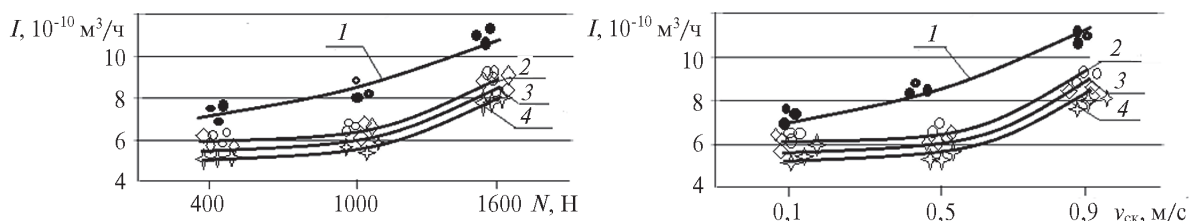


Рис. 1. Экспериментальные зависимости изменения объёмной скорости изнашивания от нагрузки и концентрации фуллереновой композиции в базовом масле: 1 — базовое масло (БМ); 2 — БМ + 50 г/кг; 3 — БМ + 100 г/кг; 4 — БМ + 150 г/кг

Рис. 2. Экспериментальные зависимости изменения объёмной скорости изнашивания от скорости скольжения и концентрации фуллереновой композиции в базовом масле: 1 — базовое масло (БМ); 2 — БМ + 50 г/кг; 3 — БМ + 100 г/кг; 4 — БМ + 150 г/кг

Анализ полученных экспериментальных зависимостей (точки на поле графика) и их сравнение с теоретическими кривыми (сплошные линии, которые получены с помощью моделирования на основании работ [5, 6]), позволяет сделать вывод, что ошибка моделирования объёмной скорости изнашивания трибосистемы [11] составляет 8,9—14,0 %. При этом большая величина ошибки соответствует большим нагрузкам. Это можно объяснить ростом температуры в зоне трения при испытаниях на более высоких нагрузках. При изменении скорости скольжения, наоборот, большая ошибка соответствует меньшей скорости скольжения. Из анализа представленных экспериментальных значений и их сравнения с теоретическими зависимостями [5, 6] следует, что математическая модель формирования масляной плёнки на поверхности трения трибоэлементов, которая разработана в работах [5, 6] адекватно отражает процесс изнашивания и находится в функциональной взаимосвязи со скоростью изнашивания.

Экспериментальные исследования позволили установить, что применение фуллереновой композиции, состоящей из растворителя и мелкодисперсного порошка фуллеренов, снижает скорость изнашивания на 21,2—24,9 %. Ошибка составляет 6,5—9,2 %.

Экспериментально подтверждены выводы, которые получены на четырехшариковой машине трения, таблица 1, что увеличение концентрации фуллереновой добавки в базовом масле М-10Г<sub>2к</sub> от 50 г/кг до 150 г/кг позволяет снизить объёмную скорость изнашивания на 22,2 %. Поэтому направление снижения объёмной скорости изнашивания за счёт увеличения концентрации фуллереновой композиции более 100 г/кг можно признать малоэффективным. Рациональной концентрацией может выступать средняя величина: 0,75 г/кг фуллеренов и 99,25 г/кг растительного масла в качестве растворителя, с последующим добавлением данной композиции на 1 кг базового масла. В объёмной концентрации это составит 10 %.

Третьим этапом испытаний эффективности фуллереновых добавок было экспериментальная оценка объёмной скорости изнашивания и коэффициента трения указанных выше композиций при изменении марки базового масла.

При испытаниях дополнительно использовались следующие марки масел: гидравлическое минеральное масло, по классификации ISO соответствует НМ, класс вязкости 10,  $E_y = 1,8 \cdot 10^{14} \text{ Дж}/\text{м}^3$ ; трансмиссионное масло, по классификации SAE 75W, API GL-5,  $E_y = 7,4 \cdot 10^{14} \text{ Дж}/\text{м}^3$ .

Результаты исследований при изменении различных марок базовых масел, трибологические свойства которых оценивались параметром  $E_y = (1,8—7,4) \cdot 10^{14} \text{ Дж}/\text{м}^3$  [9], для различных концентраций фуллереновой композиции, представлены на рис. 3.

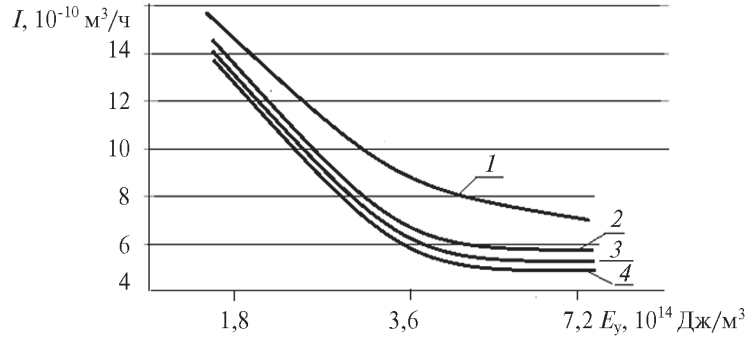


Рис. 3. Экспериментальные зависимости изменения объёмной скорости изнашивания от трибологических свойств базовых масел и концентрации фуллереновой композиции в базовых маслах: 1 – базовые масла (БМ); 2 – БМ + 50 г/кг; 3 – БМ + 100 г/кг; 4 – БМ + 150 г/кг

Из анализа полученных зависимостей представленных на рис. 3, можно сделать вывод, что введение фуллереновых композиций эффективно для базовых масел, у которых трибологические свойства находятся в пределах  $E_y = (3,0–5,0) \cdot 10^{14}$  Дж/м<sup>3</sup>, т. е. масла, со средним уровнем трибологических свойств (например, моторные масла API CC или API CF). В таком случае эффект от применения фуллереновых добавок будет составлять 20,1–22,6 % снижения объёмной скорости изнашивания.

При применении фуллереновых композиций в маслах с низким значением трибологических свойств  $E_y = 1,8 \cdot 10^{14}$  Дж/м<sup>3</sup>, например, гидравлических маслах по классификации ISO: HL; HM; эффект снижения скорости изнашивания составляет 14,8 %.

Результаты экспериментальных исследований изменения коэффициента трения для трибосистемы “сталь 40X + Бр.АЖ 9-4” при изменении нагрузки  $N$ ,  $H$  и скорости скольжения  $v_{ск}$ , м/с, представлены на рис. 4 и рис. 5. Кривая 1 соответствует коэффициенту трения трибосистемы, где в смазочном материале М-10Г<sub>2к</sub> не содержится фуллереновых композиций. Схема испытаний “кольцо—кольцо”,  $K_{вз} = 0,5$ . Нагрузка  $N = 600 \dots 1800$  Н; скорость скольжения  $v_{ск} = 0,1 \dots 0,9$  м/с. Результаты исследований представлены в виде экспериментальных точек, которые нанесены на поле графика рядом с сплошными кривыми и отражают характер изменения коэффициента трения для различных концентраций фуллереновых добавок 50–150 г/кг.

Анализ представленных экспериментальных результатов позволяет сделать вывод, что при применении фуллереновых добавок максимальный эффект снижения коэффициента трения наблюдается при нагрузках 600...1200 Н, т. е. при малых и средних нагрузках. Из зависимостей на рис.4 следует, что снижения коэффициента трения при  $N = 600$  Н равно 82 %, при  $N = 1200$  Н – 52 %. При максимальной нагрузке  $N = 1800$  Н, эффект составляет 15 %.

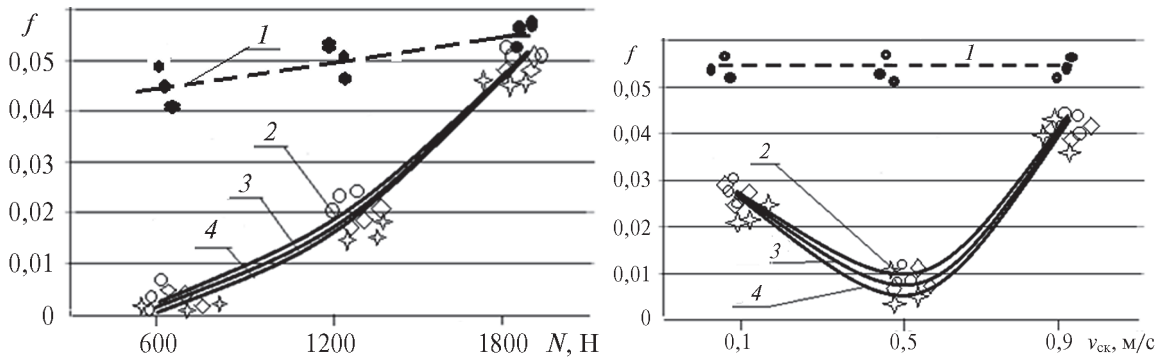


Рис. 4. Экспериментальные зависимости изменения коэффициента трения от нагрузки и концентрации фуллереновой композиции в базовом масле: 1 – базовое масло (БМ); 2 – БМ + 50 г/кг; 3 – БМ + 100 г/кг; 4 – БМ + 150 г/кг

Рис. 5. Экспериментальные зависимости изменения коэффициента трения от скорости скольжения и концентрации фуллереновой композиции в базовом масле: 1 – базовое масло (БМ); 2 – БМ + 50 г/кг; 3 – БМ + 100 г/кг; 4 – БМ + 150 г/кг

Анализ зависимостей на рис. 5 позволяет утверждать, что эффект снижения коэффициента трения  $f$  при изменении скорости скольжения имеет нелинейный характер. При эксплуатации данной конструкции трибосистемы на скорости скольжения меньше, чем 0,5 м/с, снижение коэффициента трения достигает величины 43,6 %, что подтверждает теоретические результаты, представленные в работах [5, 6]. Эффект снижения коэффициента трения на скорости скольжения 0,9 м/с не превышает 11,2 %. Для данных режимов работы трибосистемы экспериментально подтверждено наличие колебательного процесса коэффициента трения.

При эксплуатации трибосистемы на скорости скольжения, равной 0,5 м/с, установлено отсутствие колебательного процесса, а эффект от снижения коэффициента трения составляет 74 %.

На основании полученных экспериментальных результатов можно сделать вывод, что увеличение концентрации фуллереновой добавки не оказывает существенного влияния на снижение коэффициента трения. Разница в величине  $f$  при концентрации фуллереновой добавки 50—150 г/кг составляет не более 7 %.

Полученные экспериментальные результаты, которые представлены в таблице и на рис. 1 — рис. 5, позволяют утверждать, что применение фуллереновых добавок наиболее эффективно снижает коэффициент трения (на 32,4—86 %), по сравнению со скоростью изнашивания (на 20—25 %). Это свидетельствует о том, что фуллереновая композиция в жидкие смазочные материалы является антифрикционной, а затем, по степени уменьшения, противоизносной и не обладает противозадирными свойствами.

**Выводы.** Фуллереновые добавки улучшают противоизносные свойства базовых смазочных материалов на 26,6 %. При этом диапазон работы противоизносных присадок в смазочном материале увеличивается на 40,9 %. На противозадирные свойства базового смазочного материала фуллереновые добавки влияния не оказывают.

Экспериментальными исследованиями установлено, что направление снижения объёмной скорости изнашивания за счёт увеличения концентрации фуллереновой добавки более 100 г/кг можно признать малоэффективным. Рациональной концентрацией может выступать средняя величина: 0,75 г фуллеренов и 99,25 г растительного масла в качестве растворителя фуллеренов, с последующим добавлением данной композиции на 1 кг базового масла. В объёмной концентрации это составит 10 %. Дальнейшее увеличение концентрации фуллереновой добавки положительного эффекта не имеет.

Применение фуллереновых добавок наиболее эффективно снижает коэффициент трения (на 32,4—86 %), по сравнению со скоростью изнашивания (на 20—25 %). Это позволяет сделать вывод, что фуллереновая добавка в жидкие смазочные материалы является антифрикционной и в меньшей степени противоизносной, при этом не обладает противозадирными свойствами. Экспериментально подтверждено, что увеличение концентрации фуллереновой добавки не оказывает существенного влияния на снижение коэффициента трения. Разница в величине коэффициента трения при концентрациях фуллереновой композиции 50—150 г/кг составляет не более 7 %.

### Обозначения

ГОСТ — межгосударственный стандарт; РД — руководящий документ;  $N$  — нагрузка;  $v_{ск}$  — скорость скольжения;  $E_y$  — трибологические свойства смазочной среды;  $I$  — объёмная скорость изнашивания полученная по результатам эксперимента;  $f$  — коэффициент трения.

### Литература

1. Безмельницын В. Н., Елецкий А. В., Окунь М. В. Фуллерены в растворах // Успехи физических наук. — 1998 (168), № 11, 1195—1220

2. Гиндзбург Б. М., Байдакова М. В., Киреенко О. Ф. [и др.]. Влияние фуллеренов  $C_{60}$ , фуллереновых саж и других углеродных материалов на граничное трение скольжение металлов // Журнал технической физики. — 2000 (70), № 12, 87—97
3. 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
4. Семенов К. Н., Чарыков Н. А., Арапов О. В. [и др.]. Растворимость легких фуллеренов в некоторых эфирных и растительных маслах // Химия растительного сырья. — 2010, № 2, 147—152
5. Кравцов А. Г. Разработка математической модели взаимодействия электрически активных гетерогенных мелкодисперсных систем на границе раздела поверхность трения — смазочная среда // Проблемы трибології. — 2017 (85), № 1, 89—99
6. 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 трибології. — 2018 (87), № 1, 69—77
7. Фроленкова Л. Ю., Шоркин В. С. Метод вычисления поверхностной энергии и энергии адгезии упругих тел // Вестник ПНИПУ: Механика — 2013, № 1, 235—259
8. Войтов В.А., Баздеркин В. А. Универсальная машина трения // Трение и износ. — 1992 (13), № 3, 501—506
9. 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
10. Vojtov, V. A., Biekirov, A. S., Voitov, A. V., & Tsymbal, B. M. Running-in Procedures and Performance Tests for Tribosystems // Journal of Friction and Wear. — 2019 (40), no. 5, 376—383
11. Зажигаев Л. С., Кишьян А. А., Романиков Ю. И. Методы планирования и обработки результатов физического эксперимента. — М.: Автоиздат. — 1978

*Поступила в редакцию 30.03.20.*

*После доработки 25.08.20.*

*Принята к публикации 07.09.20*

Vojtov V. A., Kravcov A. G., and Tsymbal B. M. **Evaluation of Tribotechnical Characteristics of Tribosystems in the Presence of Fullerenes in the Lubricant.**

Experimental studies of tribotechnical characteristics of lubricants with fullerene compositions are presented. It has been shown that the rational concentration of fullerene additive can be 0.75 g of fullerenes and 99.25 g of vegetable oleic oil as a solvent for fullerenes, followed by the addition of this composition per 1 kg of base oil. In volume concentration this will be 10%. The results are presented which confirm that fullerene additives improve the antiwear properties of base lubricants by 26.6 %. At the same time, the range of operation of antiwear additives in the lubricant increases by 40.9%. Fullerene additives have no effect on the extreme pressure properties of the base lubricant. The use of fullerene additives most effectively reduces the coefficient of friction (by 32.4—86%), as compared to the wear rate (by 20—25%). Experimental studies have established that the direction of reducing the volumetric wear rate and the friction coefficient due to an increase in the concentration of the fullerene additive over 100 g/kg can be considered ineffective.

**Keywords:** tribosystem, tribotechnical characteristics, fullerenes, fullerene compositions, lubricants, wear rate, base oil, friction coefficient, vegetable oils.

© В. А. Войтов, А. Г. Кравцов, Б. М. Цымбал, 2020