

**Кравцов А.Г.**

Харьковский национальный технический  
университет сельского хозяйства  
им. П. Василенко,  
г. Харьков, Украина  
E-mail: kravcov\_84@ukr.net

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ  
МАСЛЯНОЙ ПЛЕНКИ НА ПОВЕРХНОСТИ  
ТРЕНИЯ ПРИ НАЛИЧИИ ФУЛЛЕРЕНОВЫХ  
ДОБАВОК В СМАЗОЧНОМ МАТЕРИАЛЕ  
И ЕЕ ВЛИЯНИЕ НА СКОРОСТЬ  
ИЗНАШИВАНИЯ ТРИБОСИСТЕМ**

УДК 621.891

В статье представлено моделирование формирования масляной пленки на поверхности трения при наличии растворов фуллеренов в смазочном материале и их влияние на скорость изнашивания трибосистем. По результатам моделирования установлено, что величина напряженности электростатического поля поверхности трения является более значимым фактором при формировании толщины масляной пленки на поверхности трения, чем величина электрического поля смазочного материала. Установлены рациональные концентрации фуллеренов и растительного масла как добавки в базовые смазочные материалы, что позволит снизить объемную скорость изнашивания трибосистем.

**Ключевые слова:** фуллереновые добавки, толщина масляной пленки, напряженность электростатического поля, кластерообразование, мицеллообразование, фуллерены, трибосистемы, смазочная среда.

**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 нанокремниевых присадок и добавок (фуллеренов C<sub>60</sub>). Наличие в смазочном материале добавок фуллеренов C<sub>60</sub> и соответствующего количества растительного масла с высоким содержанием олеиновой кислоты приводит к формированию на поверхностях трения структурированных граничных пленок, которые имеют слоистое строение.

Исследование закономерностей образования структурных тонких масляных пленок на поверхности трения имеет большое практическое значение в связи с возможностью изучения их влияния на процессы трения и изнашивания различных трибосистем. Формирование масляной пленки зависит от ряда физических и химических процессов, которые протекают на поверхности трения. Движущей силой образования и формирования пленок является физическая и химическая абсорбция, которая зависит от наличия в смазочном материале поверхностно-активных и химически-активных веществ, которые являются соответствующими функциональными присадками, а также величины напряженности электростатического поля поверхности трения.

Для выполнения моделирования роста масляной пленки на поверхности трения за счет образования электрических полей при наличии фуллереновых добавок, а также их влияния на скорость изнашивания различных конструкций трибосистем, была разработана программа с помощью программного продукта EXCEL. Программа содержит все расчетные зависимости, которые получены в работе [1], а также блок расчета скорости изнашивания из работ [2, 3].

**Цель работы**

Целью данной работы является моделирование формирования масляной пленки на поверхности трения при наличии фуллереновых добавок в смазочном материале и ее влияние на скорость изнашивания трибосистем.

**Исходные данные для выполнения моделирования.**

Исходными данными для выполнения моделирования выберем три конструкции трибосистем: «сталь 40X + сталь 40X»; «сталь 40X + СЧМ»; «сталь 40X + Бр.АЖ 9-4». Геометрические размеры трибосистем определяются номинальной площадью трения подвижного и неподвижного трибозащитных элементов, размерность м<sup>2</sup>, а также физико-механическими характеристиками: модуль упругости подвижного  $E_n$  и неподвижного  $E_n$  трибозащитных элементов, размерность Н/м<sup>2</sup>; коэффициентами Пуассона  $\nu_n$  и  $\nu_n$ .

Исходная (технологическая) шероховатость поверхностей трения определяется параметрами  $Ra$ , мкм и  $Sm$ , мм. Пределы изменения при моделировании:  $Ra = 0,1 - 0,3$  мкм;  $Sm = 0,2 - 0,12$  мм.

Структуру материала трибоэлемента выражаем через структурно-чувствительную характеристику – внутреннее трение подвижного  $\delta_n$  и неподвижного  $\delta_n$  материалов, безразмерная величина. Соче-

тание материалов в трибосистеме, согласно работ [2, 4] выразим обобщенным параметром  $\sqrt{\frac{\delta_n \cdot \delta_n}{\pi}}$ , безразмерная величина.

Смазочную среду выразим параметром  $E_y$  [5] – трибологические свойства смазочного материала, размерность Дж/м<sup>3</sup>. В процессе моделирования будем применять три типа смазочной среды:

- гидравлическое масло МГП-10,  $E_y = 1,80 \cdot 10^{14}$  Дж/м<sup>3</sup>;
- моторное масло М-10Г<sub>2к</sub>,  $E_y = 3,6 \cdot 10^{14}$  Дж/м<sup>3</sup>;
- трансмиссионное масло VALVOLINE GL-5,  $E_y = 7,2 \cdot 10^{14}$  Дж/м<sup>3</sup>;

Нагрузочно-скоростной диапазон функционирования трибосистемы определим через нагрузку  $N$ , Н и скорость скольжения  $v_{скл}$ , м/с:  $N = 400 - 1600$  Н;  $v_{скл} = 0,1 - 0,9$  м/с.

### Результаты моделирования

Перечисленные исходные данные позволяют моделировать величину напряженности электростатического поля поверхности трения, результаты моделирования представлены на рис. 1, 2.

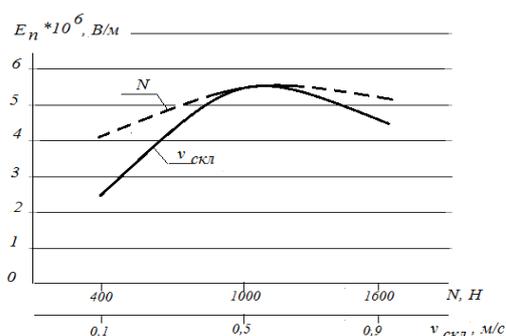


Рис. 1 – Зависимость изменения напряженности электростатического поля поверхности трения от нагрузки и скорости скольжения

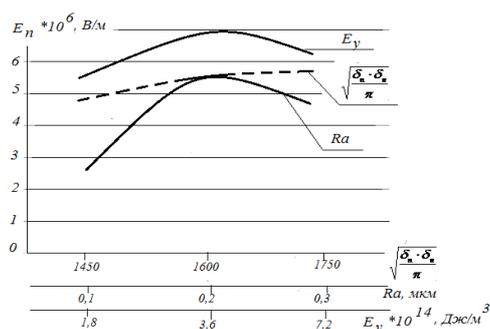


Рис. 2 – Зависимость изменения напряженности электростатического поля поверхности трения от сочетания материалов, шероховатости поверхности трения и трибологических свойств смазочной среды

Анализ зависимостей изменения величины электростатического поля поверхностей трения при изменении величины нагрузочно-скоростного диапазона, рис. 1, показывает, что существует оптимум, где  $E_n = \max$ . В данном диапазоне, при максимально возможных  $N$  и  $v_{скл}$  реализуется процесс изнашивания без повреждаемости. Слева от оптимума, энергии активации недостаточно для перестройки структуры поверхностных слоев, а справа от оптимума, энергия активации превышает значение пассивационной способности структуры материала и окружающей смазочной среды, в результате увеличивается объемная скорость изнашивания материалов. Согласно выражениям, представленных в работе [1], увеличение объемной скорости изнашивания  $I$  приводит к снижению величины электростатического поля поверхности трения.

На основании полученных теоретических зависимостей можно сделать вывод, что для трибосистемы существует оптимальный диапазон функционирования, который соответствует минимальной скорости изнашивания при максимально возможных  $N$  и  $v_{скл}$ , где электростатическое поле, генерируемое поверхностями трения, будет максимальным.

Аналогичные выводы следуют из зависимостей, представленных на рис. 2. Исключением является параметр  $\sqrt{\frac{\delta_n \cdot \delta_n}{\pi}}$ , который учитывает реологические свойства (внутреннее трение) структуры сопряженных материалов в трибосистеме. Чем больше данный параметр, тем выше значения  $E_n$  для пара-

метров шероховатости поверхностей  $Ra$ , а также трибологических свойств смазочной среды  $E_y$ , существует оптимальный диапазон их значений, где функционирование трибосистемы будет наиболее рациональным с обеспечением максимальных значений напряженности электростатического поля поверхности трения  $E_n$ . Как было показано выше величина  $E_n$  оказывает влияние на формирование величины электрического поля в масляной пленке (жидкости), т.е.  $E_n$  первично, а  $E_{жс}$  вторично.

Исходными данными для моделирования величины напряженности электрического поля в объеме масляной пленки  $E_{жс}$  является концентрация фуллеренов  $C_\phi$ , размерность моль/м<sup>3</sup> и концентрация олеиновой кислоты  $C_{olk}$ , моль/м<sup>3</sup> в объеме базового смазочного материала. Для удобства приготовления растворов мольные концентрации выражены в массовых концентрациях  $M_\phi$ , размерность гр/кг и  $M_{olk}$ , гр/кг.

Второй исходной величиной являются значения критической концентрации кластерообразования ККК и мицеллообразования ККМ, размерность моль/м<sup>3</sup>. Данные значения зависят от взаимодействия агрегатов и жидкости и изменяются в пределах 0,01 – 0,1 моль/м<sup>3</sup> [6].

Третьей исходной величиной является величина дипольного момента молекулы фуллерена и молекулы олеиновой кислоты, размерность Кл·м.

Как следует из разработанной модели, в работе [1] изменение перечисленных величин будет влиять на количество агрегатов (кластеров и мицелл), которые будут образовываться в базовой жидкости, зависимости изменения количества кластеров от концентрации фуллеренов в растворе, а также критической концентрации начала кластерообразования, представлены на рис. 3.

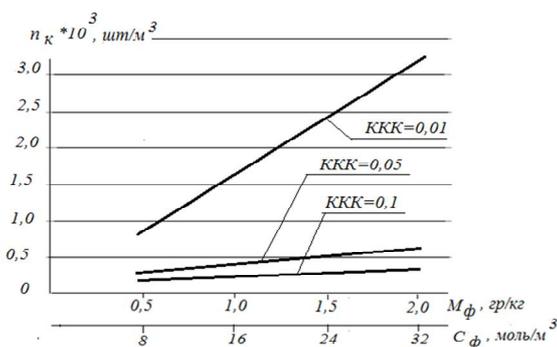


Рис. 3 – Зависимости изменения количества кластеров от концентрации фуллеренов в растворе и критической концентрации кластерообразования

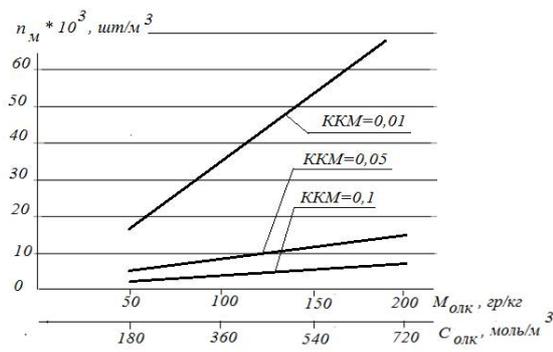


Рис. 4 – Зависимости изменения количества мицелл от концентрации олеиновой кислоты в растворе и критической концентрации мицеллообразования

Как следует из теоретических зависимостей наиболее значимым фактором является критическая концентрация кластерообразования. Аналогичный вывод следует из зависимостей, представленных на рис. 4. Откуда следует, что для увеличения числа агрегатов, которые будут образовываться в растворе (базовом масле), необходимо понижать ККК и ККМ. Одним из путей снижения критических концентраций является применение «сильных растворителей», например, растительных масел, которые содержат 72 - 82 % масс. олеиновой кислоты и неограниченно растворяются в базовых технических маслах.

При достижении ККК и ККМ в растворах начинают активно образовываться кластеры и мицеллы, а, следовательно, и изменяется дипольный момент таких агрегатов [1]. Под действием электростатического поля поверхности трения в объеме масляной пленки на поверхности трения формируется электрическое поле жидкости. Зависимости изменения напряженности электрического поля масляной пленки  $E_{жс-к}$  от концентрации фуллеренов и критической концентрации кластерообразования представлены на рис. 5, а от концентрации олеиновой кислоты  $E_{жс-м}$  и критической концентрации мицеллообразования, на рис. 6.

Анализ полученных зависимостей позволяет подтвердить ранее сделанный вывод, что растворение фуллеренов в «сильных растворителях», а затем их введение в базовые смазочные материалы позволит получить максимальные значения напряженности электрического поля в объеме масляной пленки на поверхности трения трибосистем.

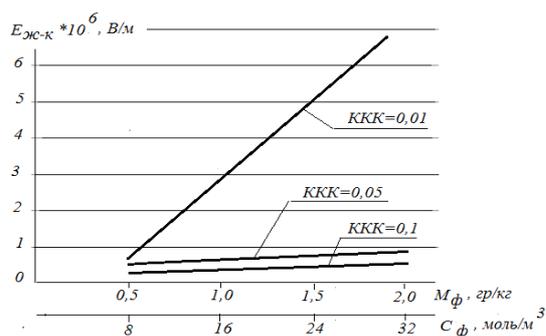


Рис. 5 – Зависимости изменения напряженности электрического поля жидкости от концентрации фуллеренов и критической концентрации кластерообразования

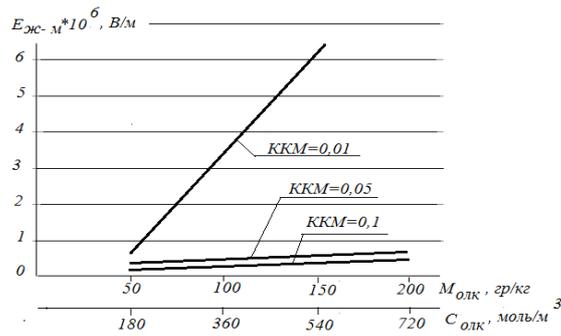


Рис. 6 – Зависимости изменения напряженности электрического поля жидкости от концентрации олеиновой кислоты и критической концентрации мицеллообразования

Зависимости суммарной напряженности электрического поля жидкости  $E_{жс}$ , которая является суммой  $E_{жс-к} + E_{жс-м}$ , создаваемой кластерами и мицеллами одновременно, от концентрации фуллеренов и «растворителя» олеиновой кислоты, представлены на рис. 7. Из зависимостей следует, что концентрация олеиновой кислоты является более значимым фактором, чем концентрация фуллеренов. Это показывает путь приготовления растворов – увеличение концентрации олеиновой кислоты,  $M_{олк} = 100 - 200$  гр/кг, при одновременном уменьшении концентрации фуллеренов,  $M_{ф} = 0,25 - 1$  гр/кг.

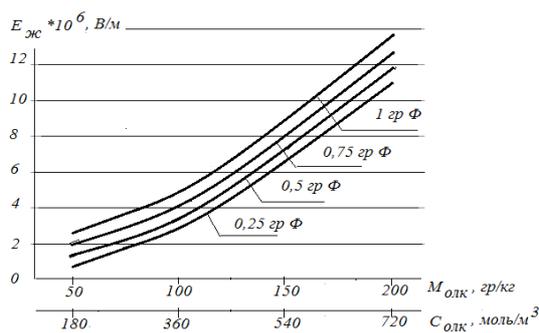


Рис. 7 – Зависимости суммарной напряженности электрического поля жидкости от концентрации фуллеренов и олеиновой кислоты в растворе

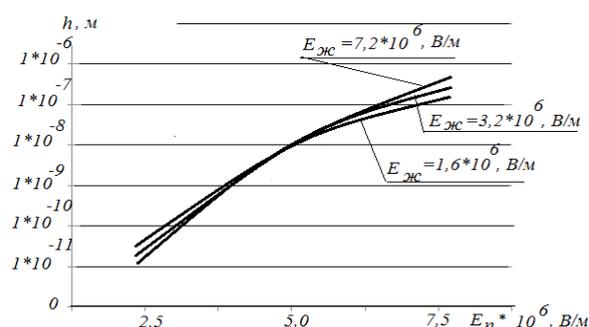


Рис. 8 – Зависимости изменения толщины масляной пленки от напряженности электрических полей поверхности трения и жидкости

Образование электрического поля жидкости суммарной напряженности  $E_{жс} = (1 - 11) \cdot 10^6$  В/м, оказывает влияние на формирование масляной пленки на поверхности трения, которая взаимодействует с поверхностными силами Ван-дер-Ваальса.

В результате взаимодействия электрических полей пленка имеет определенную толщину  $h$ . На толщину пленки оказывает влияние рабочая температура  $T$ , динамическая вязкость базовой смазочной среды, которая зависит от рабочей температуры  $\mu$ , нагрузка  $N$ , скорость скольжения  $U_{скл}$  и суммарная фактическая площадь трения  $A_{тр}$  [1].

Результаты моделирования изменения толщины масляной пленки на поверхности трения от напряженности электрических полей поверхности трения и жидкости, представлены на рис. 8. Из анализа зависимостей можно сделать вывод, что величина напряженности электростатического поля поверхности  $E_n$  является более значимым фактором, чем величина напряженности электрического поля жидкости  $E_{жс}$ . Как следует из рис. 8 при малых значениях  $E_n = 2,5 \cdot 10^6$  В/м толщина пленки составляет одну молекулу олеиновой кислоты  $h = (1 - 7) \cdot 10^{-11}$  м. При увеличении  $E_n = 7,5 \cdot 10^6$  В/м, толщина пленки увеличивается до  $h = 1 \cdot 10^{-6}$  м. Полученные результаты моделирования подтверждают, что поверхность тре-

ния, как «генератор электростатического поля», является более значимым фактором в процессе формирования масляной пленки на поверхности трения.

Степень влияния рабочей температуры  $T$  °С в объеме масляной пленки, а также динамической вязкости базового смазочного материала  $\mu$ , Па·с, на толщину смазочной пленки в зависимости от суммарной напряженности электрических полей  $E = E_n + E_{ж}$ , представлена на рис. 9 и рис. 10.

Из анализа зависимостей можно сделать вывод, что изменение температуры от  $T = 80$  °С до  $T = 160$  °С приводит к уменьшению толщины пленки от  $h = 4,5 \cdot 10^{-7}$  м до  $h = 2,5 \cdot 10^{-7}$  м. Аналогичные зависимости получены при изменении динамической вязкости базового масла, рис. 10.

Степень влияния нагрузочно-скоростных параметров функционирования трибосистемы на толщину смазочной пленки представлена на рис. 11 и рис. 12. Из зависимостей следует, что увеличение нагрузки  $N$ , Н значительно уменьшает толщину масляной пленки и, наоборот, увеличение скорости скольжения  $v_{скл}$ , м/с, приводит к увеличению толщины. При высоких рабочих нагрузках  $N = 1400$  Н и малых скоростях скольжения  $v_{скл} = 0,2$  м/с, напряженность электрических полей поверхности трения и жидкости оказывают незначительное влияние на толщину масляной пленки.

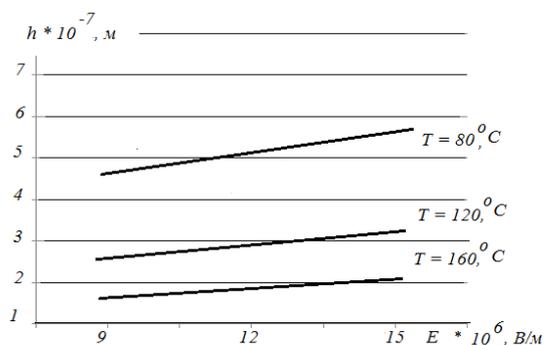


Рис. 9 – Зависимости изменения толщины смазочной пленки от величины суммарной напряженности электрических полей и рабочей температуры

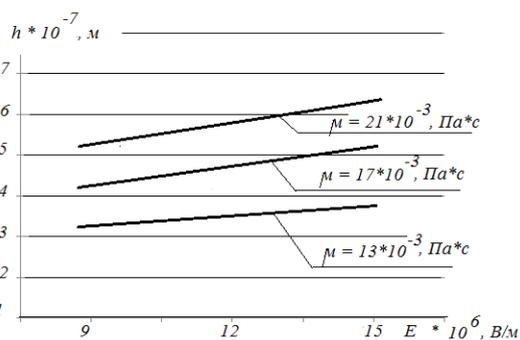


Рис. 10 – Зависимости изменения толщины смазочной пленки от величины суммарной напряженности электрических полей и динамической вязкости базового масла

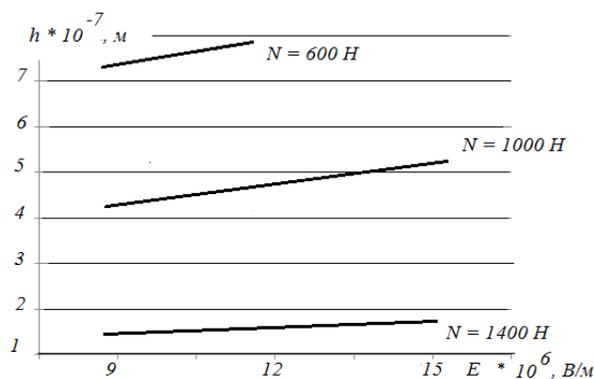


Рис. 11 – Зависимости изменения толщины смазочной пленки от величины суммарной напряженности электрических полей и нагрузки

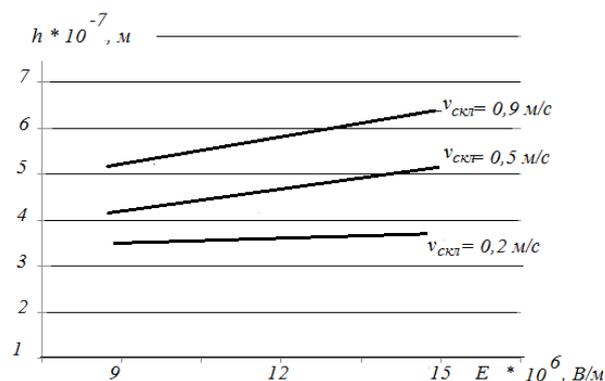


Рис. 12 – Зависимости изменения толщины смазочной пленки от величины суммарной напряженности электрических полей и скорости скольжения

Полученные результаты моделирования изменения толщины масляной пленки, которая содержит растворы фуллеренов в растительных маслах с последующим их добавлением в базовые масла, позволяют утверждать, что толщина  $h$  изменяется в пределах  $(1,7 - 6,25) \cdot 10^{-7}$  м. При этом концентрация фуллеренов находится в пределах  $M_{\phi} = (0,25 - 1)$  гр/кг, а концентрация растительного олеинового масла  $M_{olk} = (50 - 200)$  гр/кг.

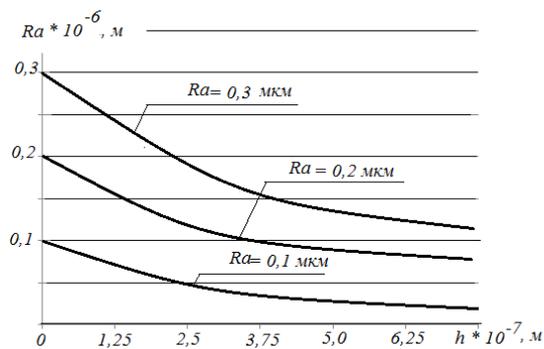


Рис. 13 – Зависимости изменения среднего арифметического отклонения точек профиля поверхности трения от толщины масляной пленки

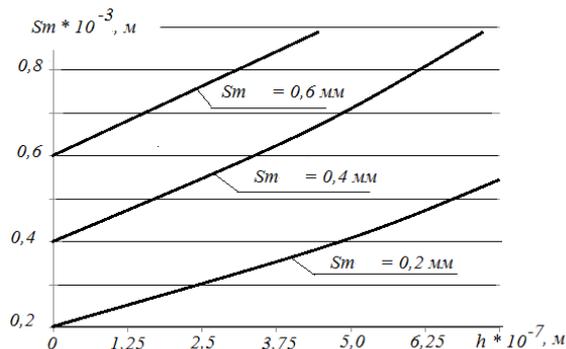


Рис. 14 – Зависимости изменения среднего шага неровностей по средней линии профиля поверхности трения от толщины масляной пленки

Формирование на поверхности трения масляных пленок из «сшитых» структур содержащих кластеры и мицеллы на основе фуллеренов, толщина которых соизмерима с величиной шероховатости поверхностей трения оказывает влияние на  $Ra$ , и  $Sm$  [1]. Результаты моделирования по полученным формулам представлены на рис. 13 и рис. 14. Как следует из представленных зависимостей образование на поверхности трения масляной пленки, в состав которой входят кластеры и мицеллы, уменьшает среднее арифметическое отклонение точек профиля  $Ra$ , мкм и, одновременно, увеличивает средний шаг неровностей по средней линии профиля  $Sm$ , мкм.

Используя методику математического моделирования, приведенную в работах [2, 3], были получены результаты изменения диаметра фактического пятна контакта  $d_{фнк}$ , м, рис. 15, и напряжений на фактическом пятне контакта  $\sigma_{фнк}$ , МПа, рис. 16, в зависимости от толщины масляной пленки, которая сформировалась на поверхности трения.

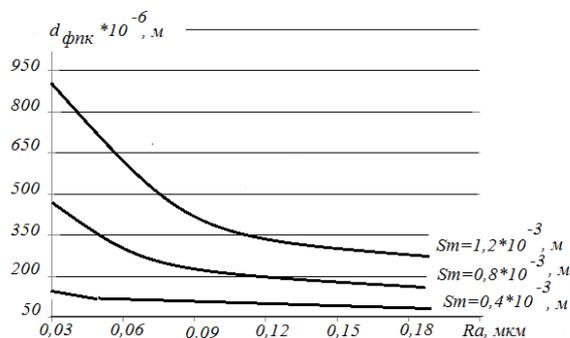


Рис. 15 – Зависимости изменения диаметра фактического пятна контакта от параметров шероховатости поверхности трения

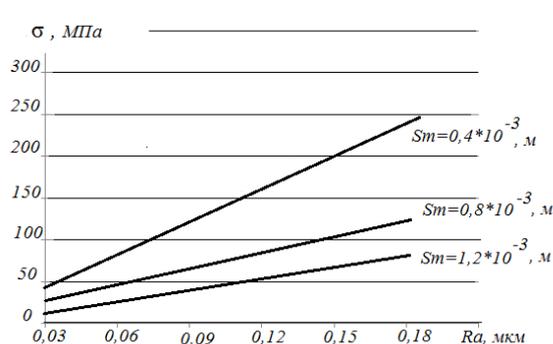


Рис. 16 – Зависимости изменения напряжения на фактическом пятне контакта от параметров шероховатости поверхности трения

Анализ полученных зависимостей позволяет утверждать, что уменьшение  $Ra$  с 0,18 мкм до 0,09 мкм (в 2 раза), при одновременном увеличении  $Sm$  от 0,4 мм до 0,8 мм (в 2 раза), приводит к снижению напряжений  $\sigma_{фнк}$  с 240 МПа до 60 МПа (в 4 раза).

Полученные значения напряжений на фактическом пятне контакта являются исходными данными для моделирования объемной скорости изнашивания  $I$ , м<sup>3</sup>/ч, при содержании в базовых маслах различных концентраций фуллеренов в составе растворителя – растительного масла.

Результаты моделирования изменения объемной скорости изнашивания для трибосистемы «сталь 40X + Бр.АЖ 9-4», базовое масло М-10Г<sub>2к</sub>,  $E_y = 3,6 \cdot 10^{14}$  Дж/м<sup>3</sup> при изменении нагрузки  $N$ , Н и скорости скольжения  $v_{скл}$ , м/с, представлены на рис. 17 и рис. 18. Кривая «базовое масло» соответствует объемной скорости изнашивания трибосистемы, где в смазочном материале М-10Г<sub>2к</sub> не содержится добавок. Нижние кривые соответствуют следующим концентрациям:

50 гр/кг = 0,5 гр/кг фуллеренов + 49,5 гр/кг растительного олеинового масла;  
 100 гр/кг = 0,75 гр/кг фуллеренов + 99,25 гр/кг растительного олеинового масла;  
 150 гр/кг = 1 гр/кг фуллеренов + 149 гр/кг растительного олеинового масла.

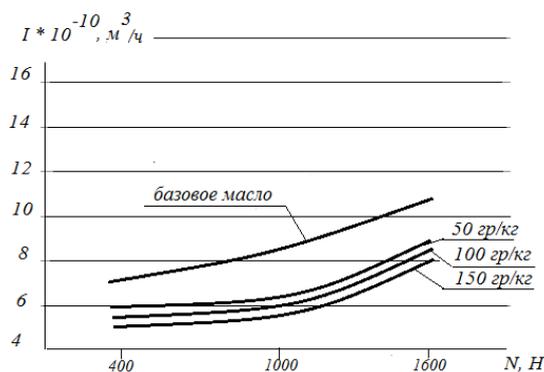


Рис. 17 – Зависимости изменения объемной скорости изнашивания от нагрузки и концентрации фуллереновой добавки в базовом масле

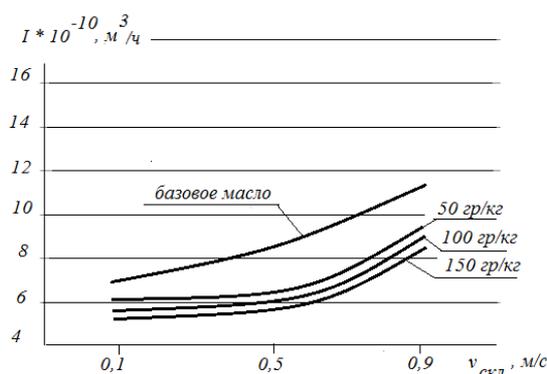


Рис. 18 – Зависимости изменения объемной скорости изнашивания от скорости скольжения и концентрации фуллереновой добавки в базовом масле

Анализ полученных зависимостей позволяет сделать вывод, что применение фуллеренов в сочетании с растительным маслом в качестве предварительного растворителя, позволяет снизить объемную скорость изнашивания трибосистемы на 27,7 – 34,1 %. Необходимо отметить, что увеличение концентрации от 50 гр/кг до 150 гр/кг позволяет снизить объемную скорость изнашивания на 6,4 %. Поэтому направление снижения объемной скорости изнашивания за счет увеличения концентрации фуллеренов и растительного масла можно признать малоэффективным. Рациональной концентрацией может выступать средняя величина: 0,75 гр/кг фуллеренов + 99,25 гр/кг растительного масла в качестве растворителя с последующим добавлением в базовое масло.

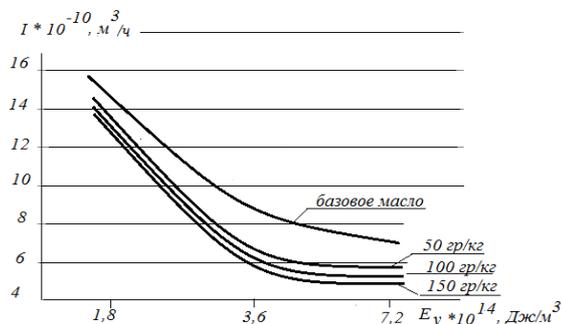


Рис. 19 – Зависимости изменения объемной скорости изнашивания от трибологических свойств базового масла и концентрации фуллереновой добавки в базовом масле

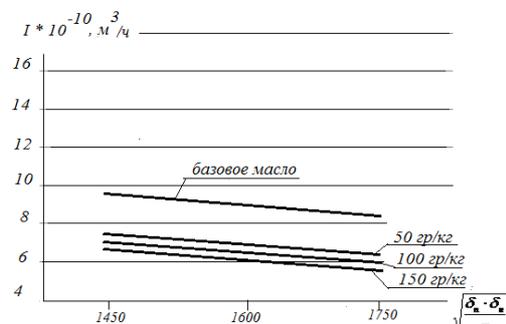


Рис. 20 – Зависимости изменения объемной скорости изнашивания от реологических свойств структуры материалов и концентрации фуллереновой добавки в базовом масле

Результаты моделирования при изменении трибологических свойств базового масла  $E_y = (1,8 - 7,2) \cdot 10^{14}$  Дж/м<sup>3</sup>, а также различного сочетания материалов в трибосистеме

$\sqrt{\frac{\delta_n \cdot \delta_n}{\pi}} = 1450 - 1750$  при изменении концентрации добавки, представлены на рис. 19 и рис. 20. При этом значения:

$$- \sqrt{\frac{\delta_n \cdot \delta_n}{\pi}} = 1450, \text{ соответствует сочетанию материалов «сталь 40X + сталь 40X»};$$

$$- \sqrt{\frac{\delta_n \cdot \delta_n}{\pi}} = 1600, \text{ соответствует сочетанию материалов «сталь 40X + СЧМ»};$$

$$- \sqrt{\frac{\delta_n \cdot \delta_n}{\pi}} = 1750, \text{ соответствует сочетанию материалов «сталь 40X + Бр.АЖ 9-4»}.$$

Из анализа полученных зависимостей можно сделать вывод, что введение фуллереновых добавок 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. В таком случае эффект от применения фуллереновых добавок будет составлять 27,8 - 28,4 % снижения объемной скорости изнашивания.

При применении фуллереновых добавок в маслах с низким значением трибологических свойств  $E_y = 1,8 \cdot 10^{14}$  Дж/м<sup>3</sup>, например, гидравлических маслах, эффект незначителен и составляет 7,6% снижения объемной скорости изнашивания.

Такой фактор, как сочетание материалов, который учитывает внутреннее трение структуры подвижного и неподвижного трибоэлементов, имеет линейную монотонную зависимость и при добавлении фуллереновых добавок в базовое масло уменьшает объемную скорость изнашивания на 25,5 %. Данная зависимость характерна для всех сочетаний материалов в трибосистемах.

Полученные результаты моделирования формирования масляной пленки на поверхности трения трибосистем при наличии фуллереновых добавок в смазочных материалах и ее влияние на объемную скорость изнашивания, являются теоретическими исследованиями и позволяют сделать следующие выводы.

### Выводы

Впервые установлено, что для трибосистем, имеющих определенные геометрические размеры, реологические свойства сочетаемых материалов, трибологические свойства базовой смазочной среды, шероховатость поверхностей трения и нагрузочно-скоростной диапазон работы, существует оптимальный диапазон функционирования, где электростатическое поле, которое генерируется поверхностью трения, имеет максимальное значение.

Теоретически установлено, что электростатическое поле поверхности трения является движущей силой для формирования электрического поля в объеме масляной пленки, которая адсорбирована на поверхности трения. Показано, что на величину напряженности электрического поля в объеме жидкости влияют процессы образования кластеров из молекул фуллеренов и мицелл из молекул фуллеренов и молекул растворителей фуллеренов. На основании обзора публикаций и выполненного моделирования установлено, что в качестве «сильного растворителя» фуллеренов может выступать высокоолеиновое растительное масло.

По результатам моделирования установлено, что величина напряженности электростатического поля поверхности трения является более значимым фактором при формировании толщины масляной пленки на поверхности трения, чем величина электрического поля смазочного материала. Установлены рациональные концентрации фуллеренов и растительного масла, как добавки в базовые смазочные материалы, которые составляют 100 гр/кг. Показано, что применение таких концентраций позволит снизить объемную скорость изнашивания трибосистем на 27,7% - 34,1%, при этом, наиболее сильный эффект проявляется в базовых маслах со средними значениями трибологических свойств.

### Литература

1. Кравцов А.Г. Разработка математической модели взаимодействия электрически активных гетерогенных мелкодисперсных систем / А. Г. Кравцов // Проблеми трибології. – 2017. – № 3. – С. 89 - 99.
2. Войтов В. А. Моделирование процессов трения и изнашивания в трибосистемах в условиях граничной смазки. Часть 1. Расчет скорости работы диссипации в трибосистемах / В. А. Войтов, М.Б. Захарченко // Проблеми трибології. – 2015. – №1. – С. 49 - 57.
3. Войтов В. А. Моделирование процессов трения и изнашивания в трибосистемах в условиях граничной смазки. Часть 2. Результаты моделирования / В. А. Войтов, М.Б. Захарченко // Проблеми трибології. – 2015. – № 2. – С. 36 - 45.
4. Захарченко М.Б. Методика оценки реологических свойств структуры сопряженных материалов в трибосистеме / М.Б. Захарченко // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П. Василенка. – Харків: ХНТУСГ, 2015. – Вип. 158. – С. 64 - 69.
5. Войтов В.А. Интегральный параметр оценки трибологических свойств смазочных материалов / В.А. Войтов, М.Б. Захарченко // Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту. – Харків: УкрДАЗТ, 2015. – Т.2. – Вип.151. – С. 5 - 10.
6. Безмельницын В.Н. фуллерены в растворах / В. Н. Безмельницын, А.В. Елецкий, М.В. Окунь // Успехи физических наук. – 1998. – Т. 168, № 11. – С. 1195 - 1220.

Надійшла в редакцію 24.03.2018

Kravtsov A.G. **Modeling the formation of an oil film on the surface in the presence of fullerene additives in a lubricant and its effect on the wear rate of tribosystems.**

The simulation of the formation of an oil film on the friction surface in the presence of solutions of fullerenes in a lubricant and their effect on the wear rate of tribosystems are presents in the paper. Based on the simulation results, it is established that the magnitude of the electrostatic field strength of the friction surface is a more significant factor in the formation of the thickness of the oil film on the friction surface than the electric field of the lubricant. Rational concentrations of fullerenes and vegetable oil as additives in base lubricants have been established, which will reduce the volumetric wear rate of tribosystems.

**Key words:** fullerene additives, the thickness of the oil film, the intensity of the electrostatic field, cluster formation, micelle formation, fullerenes, tribosystems, lubricating medium.

### References

1. Kravcov A.G. Razrabotka matematicheskoy modeli vzaimodejstviya ehlektricheski aktivnyh getero-gennyh melkodispersnyh sistem / A. G. Kravcov. Problemi tribologii. 2017. № 3. S. 89 – 99.
2. Vojtov V. A. Modelirovanie processov treniya i iznashivaniya v tribosistemah v usloviyah granichnoj smazki. CHast' 1. Raschet skorosti raboty dissipacii v tribosistemah. V. A. Vojtov, M.B. Zaharchenko. Problemi tribologii. 2015. №1. S. 49 – 57.
3. Vojtov V. A. Modelirovanie processov treniya i iznashivaniya v tribosistemah v usloviyah granichnoj smazki. CHast' 2. Rezul'taty modelirovaniya. V. A. Vojtov, M.B. Zaharchenko. Problemi tribologii. 2015. №2. S. 36 – 45.
4. Zaharchenko M.B. Metodika ocenki reologicheskikh svojstv struktury sopryazhennyh materialov v tribosisteme. M.B. Zaharchenko. Visnik Harkivs'kogo nacional'nogo tekhnichnogo universitetu sil'skogo gospodarstva im. P. Vasilenka. Harkiv: HNTUSG, 2015. Vip. 158. S. 64 – 69.
5. Vojtov V.A. Integral'nyj parametr ocenki tribologicheskikh svojstv smazochnyh materialov. V.A. Vojtov, M.B. Zaharchenko. Zbirnik naukovih prac' Ukraïns'koï derzhavnoï akademii zaliznichnogo transportu. Harkiv: UkrDAZT, 2015. T.2. Vip.151, S. 5 – 10.
6. Bezmel'nicyn V.N. fullereny v rastvorah. V. N. Bezmel'nicyn, A.V. Eleckij, M.V. Okun'. Uspekhi fizicheskikh nauk. 1998. T. 168, № 11. S. 1195 – 1220.