

Кравцов А.Г.Харьковский национальный технический
университет сельского хозяйства
им. П. Василенко, Украина
E-mail: kravcov_84@ukr.net**РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ
МОДЕЛИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИ АКТИВНЫХ
ГЕТЕРОГЕННЫХ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ
СИСТЕМ НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА
ПОВЕРХНОСТЬ ТРЕНИЯ – СМАЗОЧНАЯ
СРЕДА**

УДК 621.891

В статье выполнены теоретические исследования формирования масляной пленки на поверхности трения при наличии растворов фуллеренов в смазочном материале. 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 объеме жидкости.

Ключевые слова: напряженность электростатического поля, кластерообразование, мицеллообразование, фуллерены, трибосистемы, смазочная среда.

Введение

Моделирование механизма взаимодействия трибоактивных компонентов смазочной среды с поверхностью трения и внутреннего взаимодействия молекул смазочной среды между собой, является одной из сложных и актуальных задач трибологии. Сложность такой задачи состоит в том, что невозможно исследовать механизмы взаимодействия активных элементов смазочной среды, например, фуллеренов в процессе трения и их взаимодействие с поверхностью трения. При этом, поверхность трения в процессе работы трибосистемы под действием пластической и упругой деформации шероховатостей и материала поверхностного слоя выступает в качестве «генератора электростатического силового поля», что оказывает влияние на упорядочение структуры тонкой масляной пленки и определяет ее толщину.

Новые возможности в изучении процессов формирования пленок смазочных материалов, содержащих фуллерены, представляет компьютерное молекулярное моделирование, которое позволяет представить процесс взаимодействия молекул, кластеров и мицелл, находящихся в смазочном материале с «энергетически заряженной» поверхностью трения.

Электрически активные дисперсные системы с развитой удельной поверхностью, к которым относятся кластеры и мицеллы, в состав которых входят молекулы фуллерена, являются одним из перспективных классов современных материалов, которые в ближайшее время будут применяться при разработке новых смазочных материалов. Особые механические и электрофизические свойства таких наноматериалов во многом определяются способами их получения и в значительной степени зависят от их дисперсности, концентрации, а также химического взаимодействия входящих в их структуру компонентов. Сложность строения дисперсных систем на основе наноматериалов, а также наличие локальных неоднородностей определяют отсутствие сложившегося представления о механизме снижения износа и потерь на трение в трибосистемах, где в смазочных материалах используются фуллерены. При наличии многочисленных границ раздела в этих сложных системах суммарный эффект межфазных взаимодействий становится особенно сильным и является определяющим для процесса генерации собственных электрических полей. Такое взаимодействие приводит к возникновению электрических сил, а, следовательно, и к градиенту электростатического поля у поверхности трения.

Цель работы

Целью данной работы является разработка математической модели взаимодействия электрически активных гетерогенных мелкодисперсных систем на границе раздела поверхность трения – смазочная среда с добавлением фуллеренов в смазочный материал.

Структура математической модели

Структура математической модели формирования смазочной пленки содержащей фуллерены на поверхности трения трибосистемы состоит из следующих блоков.

1 блок – моделирование напряженности электростатического поля поверхности трения. В процессе работы трибосистемы поверхности трения, вследствие пластической и упругой деформации по-

верхностных слоев материала, накапливают поверхностную энергию, размерность Дж/м², которую можно представить как поверхностную плотность заряда, размерность Кл/м².

Данные физические величины зависят от следующих параметров: конструкции трибосистемы (площадей трения и объемов под площадями трения подвижных и неподвижных трибоэлементов); структуры материалов трибоэлементов (внутреннее трение структуры материала, модуль упругости, коэффициент Пуассона); трибологических свойств базовой смазочной среды; шероховатости поверхности трения и среднего шага неровностей (Ra , Sm); нагрузки и скорости скольжения. Перечисленные параметры позволяют определить плотность заряда, который накапливается на поверхности трения трибосистемы в процессе работы и рассчитать напряженность электростатического поля поверхности трения.

В зависимости от конструкции трибосистемы и режимов ее работы напряженность электростатического поля будет изменяться. Следовательно, поверхность трения трибосистемы можно представить в виде «генератора электростатического силового поля», размерность В/м, величина которого будет оказывать силовое воздействие на смазочную среду, находящуюся вблизи поверхности трения и формировать структуру и толщину смазочной пленки.

2 блок – моделирование напряженности электрического поля в объеме смазочного материала, который находится под воздействием силового поля поверхности трения. Под действием электростатического поля поверхности трения структура базового смазочного материала, который содержит фуллерены и другие молекулы поверхностно-активных веществ (растворителей), претерпевает изменения.

При достижении концентрации молекул фуллеренов в объеме смазочного материала, которую называют критической концентрацией кластерообразования (ККК), образуются агрегаты из однотипных молекул-кластеров. Образовавшиеся кластеры нестабильны и могут под действием температурных колебаний и внешних силовых факторов распасться и снова образовываться, что представлено в работе [1].

При введении в такую дисперсную среду сильных растворителей, в качестве которых может выступать высокоолеиновое растительное масло и при достижении определенной концентрации молекул растворителя, которую называют критической концентрацией мицеллообразования (ККМ), образуются мицеллы, состоящие из ядра в виде молекулы фуллерена и присоединенных к ядру молекул высокомолекулярной кислоты, например, олеиновой или стеариновой.

Такая перестройка структуры смазочного материала с образованием кластеров и мицелл изменяет дипольный момент вновь образованных агрегатов и влияет на формирование электрического поля в объеме жидкости.

Исходными данными для моделирования напряженности электрического поля в объеме смазочного материала являются: дипольный момент молекулы высокомолекулярной кислоты (растворителя), размерность Кл·м; критическая концентрация кластерообразования и мицеллообразования, размерность моль/м³, объемная температура смазочной среды, размерность °С; а также величина электростатического силового поля поверхности трения, размерность В/м.

Результатом моделирования является величина электрического поля в объеме смазочного материала вблизи поверхности трения.

3 блок – моделирование формирования толщины масляной пленки на поверхности трения трибосистемы. Взаимодействие электростатического силового поля поверхности трения и электрического поля объема смазочной среды способствует формированию на поверхности трения масляной пленки определенной толщины, размерность м. Данная пленка формируется за счет «сшивания» пространственных агрегатов – мицелл и кластеров в объемную структуру, напоминающую сотовую конструкцию.

Исходными данными для моделирования толщины масляной пленки являются: величина электростатического силового поля поверхности трения, В/м; величина электрического силового поля в объеме масляной пленки, В/м; рабочая температура в объеме масляной пленки, °С; динамическая вязкость базовой смазочной среды при 100°С, Па·с; суммарная фактическая площадь всех пятен контакта, м²; нагрузка, Н; скорость скольжения, м/с.

Результатом моделирования является величина толщины масляной пленки, которая электростатическими силами удерживается на поверхности трения, а также зависимости ее изменения при варьировании перечисленных выше исходных параметров.

4 блок – моделирование величины скорости изнашивания трибосистем при формировании на поверхности трения смазочных пленок, которые содержат различную концентрацию фуллеренов и их растворителей. Формирование «сшитых» структур на поверхности трения приводит к изменению среднего арифметического отклонения точек профиля Ra , мкм и среднего шага неровностей по средней линии профиля Sm , мм вновь образованных поверхностей трения.

Определение зависимостей уменьшения Ra при одновременном увеличении Sm при изменении толщины масляной пленки, позволяет моделировать величину скорости изнашивания трибосистем при изменении всех перечисленных выше параметров.

5 блок – проверка адекватности математической модели на различных конструкциях трибосистем и различной концентрации фуллеренов и растворителя фуллеренов (растительного масла).

Допущения принятые при разработке математической модели формирования масляной пленки на поверхности трения и ее влияние на скорость изнашивания.

1. Электростатическое поле поверхности трения, которое создается в результате взаимодействия поверхностей трения между собой и базовой смазочной средой, равномерно распределено по сей номинальной площади трения.

2. Электрическое поле, которое формируется в объеме смазочного материала за счет фуллеренов и растворителя, равномерно распределено по всему объему сформировавшейся масляной пленки.

3. Температура масляной пленки равномерно распределена по всему объему, а пленка максимально протяженная.

4. По характеру протекающих процессов рассматриваются установившиеся процессы трения, т.е. после завершения приработки.

Ограничения, принятые при разработке математической модели.

1. Трибосистемы функционируют в режиме граничной смазки без повреждаемости.

2. Нагрузочно-скоростной диапазон работы трибосистемы соответствует уровню, когда происходит интенсивная перестройка структуры материала поверхностных слоев.

Изложение основного материала

Электрическое взаимодействие кластеров и мицелл в смазочной среде, в состав которых входят фуллерены, с заряженной поверхностью трения, способствует образованию пространственных структур из гетерозарядов на границе раздела фаз. Такое взаимодействие формирует суммарное электрическое поле в изучаемой системе.

Наиболее удобным методом для поиска напряженности электрического поля является решение дифференциального уравнения для потенциала, которое получено на основе теоремы Остроградского-Гаусса в дифференциальной форме:

$$-\left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2}\right) = \nabla^2 \varphi = -\frac{\rho}{\epsilon \epsilon_0}, \quad (1)$$

где φ – электрический потенциал, В;

x, y, z – координаты в декартовой системе координат;

∇^2 – оператор Лапласа, являющийся суммой вторых производных по координатам;

ρ – объемная плотность заряда;

ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость смазочной среды;

ϵ_0 – диэлектрическая постоянная, равна $8,85 \cdot 10^{-12}$, Кл/В·м или Ф/м.

Уравнение (1) в технической литературе получило название уравнение Пуассона и является дифференциальным эквивалентом интегрального соотношения, по которому вычисляется потенциал φ .

При этом, в декартовых координатах можно записать:

$$\nabla^2 \varphi = \text{div grad} \varphi = \text{div } E, \quad (2)$$

где $\text{grad} \varphi$ – представляет собой векторную функцию φ ;

$\text{div } E$ – дивергенция напряженности электрического поля (дифференциальный оператор, отображающий векторное поле на скаляре).

Поскольку масляная пленка считается максимально протяженной на поверхности, а поверхностная плотность зарядов поверхности трения является постоянной, то потенциал φ и напряженность электрического поля E в пленке зависят только от координаты z (перпендикулярно к поверхности трения) и не зависят от продольных x и поперечных y координат. Следовательно в уравнении (1):

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} = 0; \quad \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = 0; \quad \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} \neq 0. \quad (3)$$

С учетом (3.3) уравнение Пуассона (3.1) можно переписать в виде:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = -\frac{\rho}{\varepsilon \varepsilon_0} = -\left(\frac{\sigma}{2\varepsilon \varepsilon_0} + \frac{n_k P_k}{4\pi \varepsilon \varepsilon_0 d_k^3} + \frac{n_m P_m}{4\pi \varepsilon \varepsilon_0 d_m^3} \right). \quad (4)$$

Введем замену в уравнении (4). первое слагаемое в правой части определяет напряженность электростатического поля создаваемого поверхностью трения в процессе работы:

$$E_n = \frac{\sigma}{2\varepsilon \varepsilon_0}, \text{ В/м}, \quad (5)$$

где σ – поверхностная плотность заряда, Кл/м².

Поверхностная плотность заряда определяется по выражению:

$$\sigma = \frac{W_{mp} \cdot h_m}{I \cdot \varphi}, \text{ Кл/м}^2, \quad (6)$$

W_{mp} – скорость работы диссипации трибосистемы, размерность Дж/с;

h_m – толщина адсорбированного слоя масла на поверхности трения, размерность, м;

I – объемная скорость изнашивания материалов трибоэлементов, размерность м³/с.

В основу получения выражения (6) положено определение поверхностной энергии. Согласно работы [2] распределенная по границе раздела фаз суммарная поверхностная энергия равна распределенной по объему поверхностного слоя материала трибоэлемента свободной энергии, которая выделяется при образовании новых поверхностей. Следовательно, на процесс образования новых поверхностей влияет скорость работы диссипации трибосистемы W_{mp} , методика расчета представлена в работе [3] и скорость изнашивания, методика моделирования представлена в работе [4]. Толщина адсорбированного слоя масла определяется во время моделирования методом последовательных итераций.

Величину электрического потенциала определим по известным формулам:

$$\varphi = \frac{Q}{4\pi \varepsilon \varepsilon_0 h_{nl}}, \text{ В}, \quad (7)$$

где Q – величина электрического заряда на поверхности трения, размерность Кл;

h_{nl} – толщина (расстояние) действия электрических сил, размерность м.

Величины Q и h_{nl} в процессе моделирования выбираются методом последовательных итераций.

Подставляя результат формулы (7) в (6), а затем в (5) можно моделировать изменение напряженности электростатического поля поверхности трения при изменении следующих входных параметров: шероховатость поверхностей трения (Ra и Sm); модуль Юнга, коэффициент Пуассона и внутреннее трение структуры сопряженных материалов; трибологических свойств базовой смазочной среды; геометрических размеров трибосистемы; нагрузки и скорости скольжения.

Второе слагаемое правой части уравнения (4) определяет напряженность электрического поля в объеме смазочной пленки за счет образования кластеров из фуллеренов. Выражение для определения величины электрического поля, на основании работы [8] запишем в виде:

$$E_k = \frac{n_k P_k}{4\pi \varepsilon \varepsilon_0 d_k^3}, \text{ В/м}, \quad (8)$$

где n_k – количество кластеров на единицу объема базового смазочного материала, шт;

P_k – дипольный момент кластеров, размерность Кл·м;

d_k – среднее расстояние между кластерами и поверхностью трения, равная среднему размеру (диаметру) кластеру, размерность м.

Количество кластеров n_k , которые могут образовываться в базовой смазочной среде можно определить по свободной энергии Гиббса или потенциалу Гиббса, величина которого показывает изменения в ходе химической реакции. Изменение энергии Гиббса определяют по выражению [5]:

$$\Delta G_k = -RT \ln(C_\phi / KKK), \text{ Дж/моль}, \quad (9)$$

где R – универсальная газовая постоянная равная 8,3144598 Дж/(моль·°К);

T – температура смазочной среды, °К;

C_ϕ – концентрация фуллеренов в смазочной среде, размерность моль/м³;

KKK – критическая концентрация кластерообразования из молекул фуллеренов, размерность моль/м³.

Из формулы (9) можно получить выражение для определения количества кластеров:

$$n_k = \frac{C_k}{KKK} = \exp(\Delta G_k / RT), \text{ шт.} \quad (10)$$

Дипольный момент кластера p_k определим по выражению, которое представлено в работе [6]:

$$p_k = \sum_{i=1}^{n_k} p_\phi \cdot L(\epsilon_k), \text{ Кл·м}, \quad (11)$$

где p_ϕ – дипольный момент молекулы фуллерена, равен $3,34 \cdot 10^{-30}$ Кл·м;

$L(\epsilon_k)$ – функция Ланжевена.

Функция Ланжевена на основании работы [7] определяется по выражению:

$$L(\epsilon_k) = \text{cth } \epsilon_k - 1/\epsilon_k, \text{ Кл·м}, \quad (12)$$

где ϵ_k – безразмерная величина, которая учитывает напряженность электростатического поля поверхности трения E_n и температуру смазочной среды, что влияет на ориентацию кластеров относительно вектора напряженности электростатического поля поверхности трения:

$$\epsilon_k = \frac{n_k \cdot p_\phi \cdot E_n}{kT}, \quad (13)$$

где k – постоянная Больцмана, равная $1,380648 \cdot 10^{-23}$ Дж/°К.

Подставляя полученные выражения (10) – (13) в формулу (8) можно моделировать изменения напряженности электрического поля смазочной среды при изменении концентрации фуллеренов, температуры и величины напряженности электростатического поля поверхности трения.

Третье слагаемое в правой части уравнения (4) определяет напряженность электрического поля в объеме смазочной пленки за счет образования мицелл, где в качестве ядра выступает молекула фуллерена или кластер из фуллеренов, который окружают присоединенные молекулы высокомолекулярной кислоты (олеиновой, стеариновой и т.д.). Такие кислоты выступают в качестве «растворителя» фуллеренов. Выражение для определения величины электрического поля за счет образования мицелл запишем в виде:

$$E_m = \frac{n_m P_m}{4\pi\epsilon\epsilon_0 d_m^3}, \text{ В/м}, \quad (14)$$

где n_m – количество мицелл на единицу объема базового смазочного материала, шт;

P_m – дипольный момент мицеллы, Кл·м;

d_m – среднее расстояние между мицеллой и поверхностью трения, равное среднему размеру (диаметру) мицеллы, размерность м.

Количество мицелл, которые могут образоваться в базовой смазочной среде определим на основании изменения энергии Гиббса:

$$\Delta G_m = -RT \ln(C_m / KKM), \text{ Дж/моль}, \quad (15)$$

где C_m – концентрация мицелл в базовой смазочной среде, размерность моль/м³;

KKM – критическая концентрация мицеллообразования, моль/м³.

Исходя из (15) количество мицелл определим по выражению:

$$n_m = \exp(\Delta G_m / RT), \text{ шт.} \quad (16)$$

Дипольный момент мицеллы определим из выражения:

$$P_m = \sum_{i=1}^{n_m} p_{ek} \cdot L(\vartheta_m), \text{ Кл·м}, \quad (17)$$

где p_{ek} – дипольный момент молекулы высокомолекулярной кислоты, например, для олеиновой кислоты $p_{ek} = 4,84 \cdot 10^{-30}$ Кл·м.

Функция Ланжевена, как и в случае с образованием кластеров, учитывает ориентацию мицелл в электростатическом поле, создаваемом поверхностью трения с учетом тепловых колебаний молекул:

$$L(\vartheta_m) = \text{cth } \vartheta_m - 1/\vartheta_m, \quad (18)$$

$$\vartheta_m = \frac{n_m \cdot p_{ek} \cdot E_n}{kT}. \quad (19)$$

Подставляя полученные выражения (16) – (19) в формулу (14) можно моделировать изменения величины напряженности электрического поля смазочной пленки при изменении концентрации растворителя фуллеренов, что приводит к образованию мицелл. Как следует из полученных выражений на процесс мицеллообразования, кроме концентрации растворителя фуллеренов, влияет температура смазочной среды и напряженность электростатического поля поверхности трения.

В процессе функционирования трибосистемы за счет влияния температуры, а также нагрузки и скорости скольжения процесс кластеро- и мицеллообразования, а также их разрушения может происходить одновременно, следовательно, суммарное электрическое поле смазочной среды $E_{\text{жс}}$ определяется как сумма:

$$E_{\text{жс}} = E_k + E_m, \text{ В/м}, \quad (20)$$

Решением дифференциального уравнения (3.4) является функция:

$$E(z) = (E_n + E_{\text{жс}}) \exp(-z), \text{ В/м}, \quad (21)$$

где z – расстояние от поверхности трения по нормали, размерность мкм.

Результаты теоретических исследований

Результаты анализа решения дифференциального уравнения в виде функции (21) представлены на рис. 1 – 3. Анализ полученных зависимостей позволяет сделать следующие выводы.

Увеличение количества агрегатов (кластеров и мицелл) в объеме смазочного материала, рис. 1, увеличивает суммарную напряженность электрического поля $E_{\text{жс}}$, которое формируется под действием электростатического поля поверхности трения E_n . При этом, применяя «растворитель» для фуллеренов в виде высокомолекулярных кислот можно добиться увеличения количество агрегатов более чем на порядок. Объясняется это тем, что при применении «растворителя» молекулы фуллерена в меньшей степени образуют в смазочном материале кластеры, а начинают активно образовывать мицеллы, что доказано в работе [1]. Ядром мицеллы выступает единичная молекула фуллерена или кластер из нескольких молекул с присоединенными к ядру полярными молекулами высокомолекулярной кислоты, например, олеиновой.

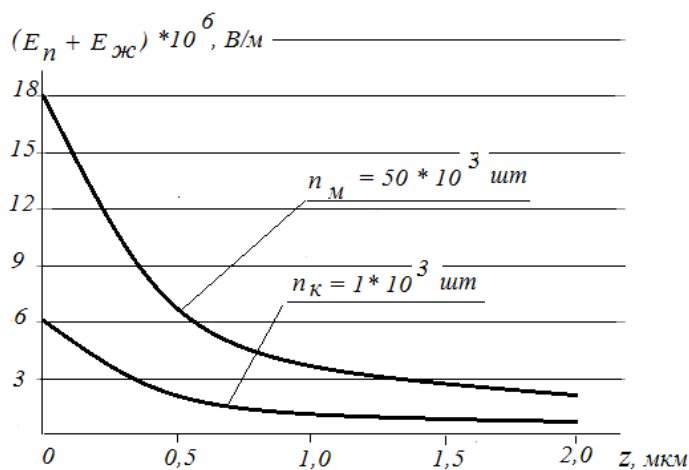


Рис. 1 – Зависимости изменения напряженности электрического поля в смазочной пленке от количества агрегатов и расстояния от поверхности трения

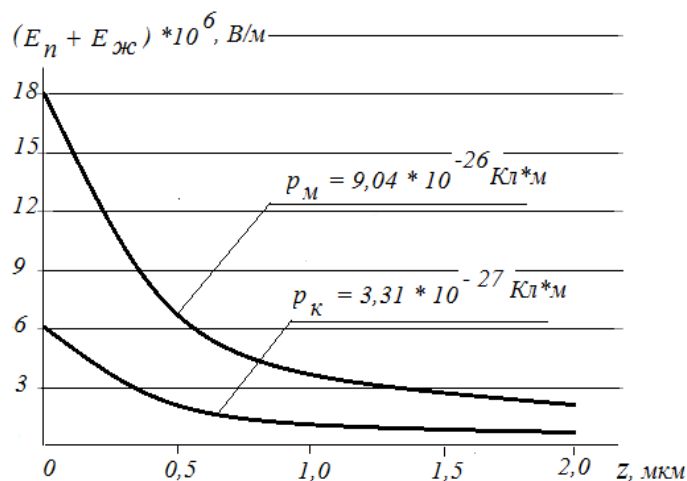


Рис. 2 – Зависимости изменения напряженности электрического поля в смазочной пленке от величины дипольного момента агрегатов и расстояния от поверхности трения

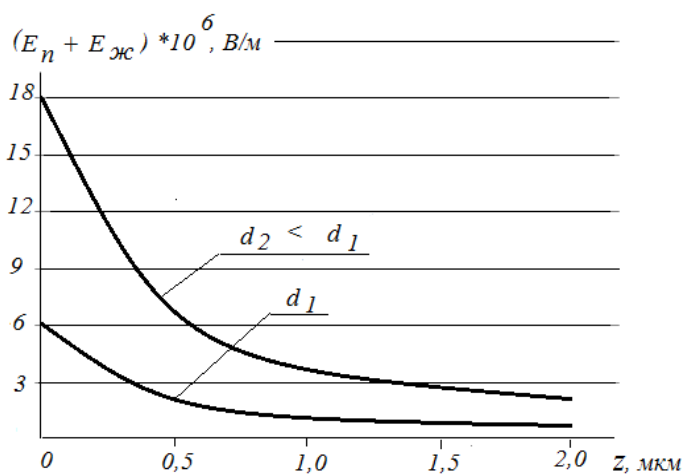


Рис. 3 – Зависимости изменения напряженности электрического поля в смазочной пленке от размера агрегатов и расстояния от поверхности трения

Необходимо отметить, что глубина проникновения электрического поля в смазочный материал z не превышает 2 мкм. Согласно результатов проведенного численного анализа при $z = 2$ мкм величина суммарного электрического поля уменьшается от 100% до 13%.

Зависимости изменения суммарной напряженности электрического поля в смазочной пленке от величины дипольного момента агрегатов и расстояния от поверхности трения представлены на рис. 2. Из представленных зависимостей следует, что чем выше дипольный момент агрегатов, тем больше величина суммарной напряженности электрического поля в объеме масляной пленки. Данный эффект будет положительно влиять на формирование структуры смазочной пленки на поверхности трения и на износостойкость трибосистемы. Увеличению дипольного момента агрегатов способствует формирование мицелл. Такой процесс можно вызвать применением «растворителя» фуллеренов с последующим введением в смазочный материал.

Зависимости изменения суммарной напряженности электрического поля в смазочной пленке от размера агрегатов представлены на рис. 3. Из представленных зависимостей следует, что чем меньше размер d , тем выше величина напряженности электрического поля, что положительно для процесса трения. На основании сделанных выше выводов о влиянии количества агрегатов и их дипольных моментов на величину суммарного электрического поля, можно обосновать необходимость применения «растворителя» фуллеренов, который вызовет образование мицелл с ядром в одну молекулу фуллерена. На основании работы [1] можно сделать вывод, что в качестве «растворителей» могут выступать высокомолекулярные кислоты. Однако, в работах академика П.А. Ребиндера доказано, что существует предельная растворимость высокомолекулярных кислот в смазочных материалах, не более 0,2% масс. Данную проблему можно решить применением высокоолеиновых сортов растительных масел, рапсового или подсолнечного, в составе которых содержится 76 – 82% масс. олеиновой кислоты. Данные растительные масла неограниченно растворяются в минеральных и синтетических технических маслах (моторных, трансмиссионных, гидравлических). Предварительно растворяя в растительном масле фуллерены, а затем добавляя такой раствор «фуллерены + растворитель» в базовую смазочную среду, можно добиться эффектов, которые получены из анализа решения дифференциального уравнения (21).

Применяя метод анализа размерностей, который широко применяется в теории подобия и моделирования, а также экспериментальные данные, можно получить выражение для определения толщины смазочной пленки, которая будет сформирована на поверхности трения под влиянием силовых электрических полей поверхности трения и жидкости:

$$h = \frac{\mu(T) \cdot A_{mp} \cdot v_{скл}}{N} \left(\frac{E_n + E_{жс}}{\sqrt{E_n^2 + E_{жс}^2}} \right), \text{ м}, \quad (22)$$

где h – толщина смазочной пленки, м;

$\mu(T)$ – функция изменения динамической вязкости базовой смазочной среды от температуры,

Па·с;

A_{mp} – фактическая площадь трения, которая является суммой площадей трения всех пятен фактического контакта, м²;

$v_{скл}$ – скорость скольжения, м/с;

N – нагрузка на трибосистему, Н.

Рабочую температуру в объеме масляной пленки T определим по выражению:

$$T = T_{oc} \exp(W_{mp} \cdot f), \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (23)$$

где T_{oc} – температура окружающей среды, $^\circ\text{C}$;

W_{mp} – скорость работы диссипации в трибосистеме, Дж/с, определяется по методике приведенной в работе [3];

f – коэффициент трения, безразмерная величина, определяется по методике приведенной в работе [3].

Функцию изменения динамической вязкости смазочной среды при изменении температуры определим по выражению:

$$\mu = \mu_0 \exp(-\alpha(T - T_0)), \text{ Па}\cdot\text{с}, \quad (24)$$

где μ_0 – динамическая вязкость смазочного материала при 100 °С, Па·с;

α – пьезокоэффициент, равный 0,013;

T – рабочая температура, определяется по формуле (23), °С;

T_0 – температура, при которой определяют μ_0 , т.е. равная 100 °С.

Результат изменения $\mu(T)$, который получают с помощью формул (23) и (24), подставляют в выражение (22) для моделирования изменения толщины смазочной пленки h .

Толщина смазочной пленки h , как следует из выражения (22), зависит от большого количества рабочих, технологических и конструктивных параметров, которые перечислены выше. В конечном счете h влияет на величину (технологической или рабочей шероховатости) Ra и Sm за счет образования «сшитых структур» из мицелл и кластеров, которые удерживаются на поверхности трения силами электростатического взаимодействия. Такие структуры «выравнивают» поверхности трения в сторону уменьшения Ra и увеличения Sm . На основании полученных экспериментальных данных нами были получены следующие зависимости:

$$Ra = Ra, 0 \exp(-h/0,8 \cdot 10^{-6}), \text{ мкм}, \quad (25)$$

$$Sm = Sm, 0 \exp(h/0,8 \cdot 10^{-6}), \text{ мм}, \quad (26)$$

где $Ra, 0$ – исходное среднее арифметическое отклонение точек профиля, без применения наноматериалов, размерность, мкм;

$Sm, 0$ – исходный средний шаг неровностей по средней линии профиля, размерность, мм;

$0,8 \cdot 10^{-6}$ – коэффициент, учитывающий размерность величин.

Как следует из полученных выражений применение наноматериалов в составе различных растворителей в базовых смазочных жидких материалах будет уменьшать Ra формула (25) и увеличивать Sm , формула (26), что повлечет увеличение диаметра фактического пятна контакта $d_{фнк}$ сопрягаемых поверхностей трения и снижение напряжений на фактическом пятне контакта $\sigma_{фнк}$. Данные параметры позволяют моделировать изменение величины объемной скорости изнашивания трибосистемы при варьировании: концентрации фуллеренов; конструкции трибосистемы; нагрузочно-скоростного диапазона функционирования трибосистемы и трибологических свойств базовой смазочной среды, куда будут добавляться растворы фуллеренов.

Выводы

Разработанная система физических принципов и математических выражений является математической моделью взаимодействия электрически активных гетерогенных мелкодисперсных систем на границе раздела поверхность трения – смазочный материал. Из анализа решения дифференциального уравнения, которое описывает процесс взаимодействия электрических полей установлено, что введение фуллеренов в базовый смазочный материал не приносит большого эффекта.

Теоретическим путем установлено, что применение «растворителей» фуллеренов, в качестве которых могут выступать высокоолеиновые растительные масла, можно «запутать» процесс мицеллообразования, где ядром мицеллы является молекула фуллерена, окруженная молекулами, например, олеиновой или стеариновой кислоты. Как показали теоретические исследования количество мицелл в 50 раз превышает количество кластеров в базовой смазочной среде при одинаковой концентрации фуллеренов, а дипольный момент мицелл на порядок выше, чем дипольный момент кластеров. При этом, более эффективны мицеллы, где в качестве ядра выступает единичная молекула фуллерена, а не кластер из молекул фуллеренов, что влияет на размер образовавшихся мицелл.

Впервые установлена роль поверхности трения на процесс образования кластеров и мицелл в пленки смазочного материала у поверхности трения. Показано, что под действием напряженно-деформированного состояния поверхностных слоев поверхность трения выступает в качестве «генератора электростатического силового поля», которое оказывает влияние на формирование электрического поля в объеме масляной пленки. Получены выражения для расчета величины напряженности суммарного электрического поля системы «поверхность трения + смазочный материал».

Литература

1. 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.
2. Фроленкова Л.Ю. Метод вычисления поверхностной энергии и энергии адгезии упругих тел / Л.Ю. Фроленкова, В.С. Шоркин // Вестник ПНИПУ: Механика – 2013. – № 1 – С. 235 – 259.
3. 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 // Проблемы трибології. – 2015. – №1. – С. 49 – 57.
4. Войтов В. А. Моделирование процессов трения и изнашивания в трибосистемах в условиях граничной смазки. Часть 2. Результаты моделирования / В. А. Войтов, М.Б. Захарченко // Проблемы трибології. – 2015. – №2. – С. 36 – 45.
5. Базаров И.П. Термодинамика / И.П. Базаров. – М.: Высш. Школа, 1991. – 376 с.
6. Лысиков Е.Н. Надмолекулярные структуры жидких смазочных сред и их влияние на износ технических систем / Е.Н. Лысиков, В. Б. Косолапов, С.В. Воронин. – Харьков: ЭДЭНА, 2009. – 274 с.
7. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела / пер. с англ.– М.: Наука, 1978. – 522 с.
8. Борисов В.С. Особенности состояния термодинамического равновесия тонкой водной пленки, находящейся в электрическом поле активных центров поверхности кристалла слюды / В.С. Борисов, Л.А. Щербаченко // Физика твердого тела. – 2009. – Т.51. – Вип.12.– С. 2394 – 2399.

Поступила в редакцію 25.09.2017

Kravtsov A.G. Development of a mathematical model for the interaction of electrically active heterogeneous fine-dispersed systems at the interface between the friction surface and the lubricating medium

Theoretical studies of the formation of an oil film on a friction surface in the presence of solutions of fullerenes in a lubricant are performed in the article. The mathematical model is developed on the basis of the interaction of electrically active heterogeneous fine-dispersed systems on the interface between the friction surface and the lubricating medium and is described by the differential Poisson equation. The relationship between the electrostatic field of the friction surface and the electric field in the bulk of the liquid is shown.

It has been theoretically established that the use of "solvents" of fullerenes, which may be highly oleic vegetable oils, can be "confused" with the process of micelle formation, where the core of the micelle is a fullerene molecule surrounded by molecules, for example, oleic or stearic acid.

It is shown that under the action of the stress-strain state of surface layers, the friction surface acts as an "electrostatic force field generator", which influences the formation of an electric field in the volume of the oil film. Expressions are obtained for calculating the strength of the total electric field of the "friction surface + lubricant" system.

Keywords: electrostatic field strength, clustering, micellization, fullerenes, tribosystems, lubricating medium

References

1. Bezmel'nicyn V.N. fullereny v rastvorah / V. N. Bezmel'nicyn, A.V. Eleckij, M.V. Okun' // Uspehi fizicheskikh nauk. – 1998. – T. 168, № 11. – S. 1195 – 1220.
2. Frolenkova L.Ju. Metod vychislenija poverhnostnoj jenergii i jenergii adgezii uprugih tel / L.Ju. Frolenkova, V.S. Shorkin // Vestnik PNIPU: Mehanika – 2013. – № 1 – S. 235 – 259.
3. Vojtov V. A. Modelirovanie processov trenija i iznashivaniya v tribosistemah v uslovijah granichnoj smazki. Chast' 1. Raschet skorosti raboty dissipacii v tribosistemah / V. A. Vojtov, M.B. Zaharchenko // Problemi tribologii. – 2015. – №1. – S. 49 – 57.
4. Vojtov V. A. Modelirovanie processov trenija i iznashivaniya v tribosistemah v uslovijah granichnoj smazki. Chast' 2. Rezul'taty modelirovanija / V. A. Vojtov, M.B. Zaharchenko // Problemi tribologii. – 2015. – №2. – S. 36 – 45.
5. Bazarov I.P. Termodinamika / I.P. Bazarov. – M.: Vyssh. Shkola, 1991. – 376 s.
6. Lysikov E.N. Nadmolekuljarnye struktury zhidkih smazochnyh sred i ih vlijanie na iznos tehniceskikh sistem / E.N. Lysikov, V. B. Kosolapov, S.V. Voronin. – Har'kov: JeDJeNA, 2009. – 274 s.
7. Kittel' Ch. Vvedenie v fiziku tverdogo tela / per. s angl.– M.: Nauka, 1978. – 522 s.
8. Borisov V.S. Osobennosti sostojaniya termodinamicheskogo ravnovesija tonkoj vodnoj plenki, nahodjashhejsja v jelektricheskom pole aktivnyh centrov poverhnosti kristalla sljudy / V.S. Borisov, L.A. Shherbачenko // Fizika tverdogo tela. – 2009. – T.51. – Vip.12.– S. 2394 – 2399.